AGFW Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V.

Gefördert durch:
Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Sustainable Asset Management Fernwärme



SAM-FW

- aktueller Stand und zukünftige Entwicklungen –

3S Consult GmbH Strömung Struktur · Applus IMA · Fraunhofer IEE · hcu HafenCity Universität Hamburg · ipf Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden · inetz Ein Unternehmen von eins

Netz Leipzig · mainova · Stadtwerke Karlsruhe Besser versorgt, weiter gedacht · stadtwerke rosenheim · Technische Universität Chemnitz · TUCtt

Praxisleitfaden des AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V.

Herausgeber:
AGFW | Der Energieeffizienzverband für
Wärme, Kälte und KWK e. V
Stresemannallee 30
D-60596 Frankfurt am Main
Telefon: +49 69 6304-1
Telefax: +49 69 6304-391
E-Mail: info@agfw.de
Internet: www.agfw.de

Verantwortlich:
Dipl.-Ing. Stefan Hay
Telefon: +49 69 6304-345
E-Mail: s.hay@agfw.de

Hinweis:
Jede Art der Vervielfältigung, auch auszugsweise, ist nur mit Genehmigung des Herausgebers gestattet. Alle Angaben in dieser Broschüre sind nach bestem Wissen unter Anwendung aller gebotenen Sorgfalt erstellt worden. Trotzdem kann von den Autoren, den Herausgebern und dem Verlag keine Haftung für etwaige Fehler übernommen werden.

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Herausgebers unzulässig und strafbar. Das gilt vor allem für Vervielfältigungen in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrokopie oder ein anderes Verfahren), Übersetzungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Stand: April 20251 / 1. Auflage

© AGFW, Frankfurt am Main

Sustainable Asset Management Fernwärme:

Wie vorausschauende Instandhaltungsstrategien und Nachhaltigkeitskriterien im Asset Management von Wärmenetzen genutzt werden können

- aktueller Stand und zukünftige Entwicklungen -

Autoren: Dipl.-Ing. Stefan Hay, M. Sc. Tillmann Deselaers, Dr. Heiko Huther (AGFW)

Prof. Dr.-Ing. Ingo Weidlich, M. Sc. Pakdad Langgroudi, M.Sc. Stefan Dollhopf (HCU)

Dipl.-Ing. Ingo Kropp, Maria Schwarze (3S Consult)

Dr.-Ing. Anna Marie Cadenbach, Dipl.- Ing. Dennis Lottis, Dipl.-Ing. Holger Dittmer (Fraunhofer IEE)

Prof. Dr.-Ing. Thorsten Urbaneck, M. Sc. Nils Zimmerling (TU Chemnitz)

Förderkennzeichen: 03EN3078

April 2025

Das dieser Studie zugrundeliegende Vorhaben **„EnEff: Wärme Sustainable Asset Management Fernwärme: Nachhaltigkeitsbewertung von Wärmenetzen für die Erhöhung der Nutzungsdauer und Effizienzsteigerung im Betrieb**“ wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages unter den Förderkennzeichen 03EN3078 (A, B, C, D, E, F, G, H, I, J) gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren. Trotzdem kann von den Autoren, den Herausgebern und dem Verlag keine Haftung für etwaige Fehler übernommen werden.

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Jede Art der Vervielfältigung, auch auszugsweise, ist nur mit Genehmigung der Herausgeber gestattet.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung 4
1.1 Motivation für Sustainable Asset Management im Bereich Fernwärme 5
1.2 Begriffe und Definitionen 6
1.3 Asset Management Fernwärmenetze heute 9
1.4 Zukünftige Betriebsweisen und der Auswirkungen auf das Asset Management 24
2. Stand der Technik und der Forschung bei vorausschauenden Instandhaltungsalgorithmen 29
2.1 Überblick vorausschauende Instandhaltung (Predictive Maintenance) 29
2.2 Rolle der Künstlichen Intelligenz in der Predictive Maintenance 31
2.3 Wissenschaftliche Forschung zu aktuellen Algorithmen 33
2.4 Kritik und identifizierte Lücken 35
2.5 Einordnung Fernwärme hinsichtlich des Stands bzgl. vorausschauende Instandhaltung 36
3. Lebenszyklus-Bewertung und Kreislaufwirtschaft von Wärmenetzen .... - 44 -
3.1 Konzept der Ökobilanzierung .... - 44 -
3.2 Anwendung der Ökobilanzierung für Wärmenetze .... - 46 -
3.3 Literaturrecherche zum Stand des Wissens .... - 47 -
3.4 Identifizierte Herausforderungen und Chancen .... - 49 -
3.5 Aspekte der Kreislaufwirtschaft .... - 51 -
3.6 Entwicklungen in der Branche .... - 53 -
4. Kriterienkatalog für die Algorithmusentwicklung .... - 55 -
4.1 Definition und Bedeutung der Kriterien .... - 55 -
4.2 Methodik zur Katalogerstellung .... - 59 -
4.3 Integration von Nachhaltigkeitsaspekten in die Kriterien für Algorithmen .... - 62 -
5. Entwicklung eines Kennzahlensystems (KPI-System) für Fernwärmenetze .... - 64 -
5.1 Zielstellung .... - 64 -
5.2 Vorgehensweise .... - 64 -
5.3 Anforderungen an das Kennzahlensystem .... - 64 -
5.4 Literaturrecherche zu Kennzahlen .... - 65 -
5.5 Vorschlag für ein Kennzahlensystem mit Fokus auf Nachhaltigkeit und Instandhaltung .... - 65 -
6. Schlussfolgerung .... - 81 -
6.1 Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse .... - 81 -
6.2 Implikationen für zukünftige Forschung und Entwicklung: Lücken und Herausforderungen .... - 85 -
6.3 Fazit .... - 85 -

7. Abbildungsverzeichnis ..... - 88 -
8. Tabellenverzeichnis ..... - 90 -
9. Literaturverzeichnis ..... - 92 -
10. Anhang ..... - 103 -
10.1 Kurzzusammenfassung der Literatur zu vorhandenen Kennzahlensystemen bzw. Kennzahlen ..... - 103 -

1. Einleitung

Autor: Stefan Hay

Im vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz geförderten Verbundforschungsvorhaben „Sustainable Asset Management Fernwärme: Nachhaltigkeitsbewertung von Wärmenetzen für die Erhöhung der Nutzungsdauer und Effizienzsteigerung im Betrieb“ verfolgen die Verbundpartner HafenCity Universität Hamburg, 3S Consult GmbH, Applus IMA Materialforschung und Anwendungstechnik GmbH, IPF Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e.V., Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik, Technische Universität Chemnitz, Netz Leipzig GmbH, Stadtwerke Karlsruhe GmbH, inetz GmbH und der Fernwärmebranchenverband AGFW gemeinsam das Ziel bestehende Asset Management Tools durch wissenschaftliche Erkenntnisse weiter zu entwickeln. Ansatz hierfür bilden wissenschaftliche Untersuchungen

- zur Zustandsanalyse und -bewertung bestehender Fernwärmeleitungen.
- zur Umsetzung von Transformations- und Digitalisierungsstrategien in den Wärmenetzen der drei direkt beteiligten und assoziierten Praxispartner auf Grundlage wissenschaftlicher Erkenntnisse.
- zur Beschreibung von Alterungsprozessen auf Grundlage materialwissenschaftlicher Untersuchungen an praxisgealterten Fernwärmeleitungen im Labor und im Feld an Probekörpern der Praxispartner.
- zur Erarbeitung/Verbesserung, Implementierung und Validierung von selbstlernenden Algorithmen (KI) zur Beschreibung von Alterungsprozessen in Fernwärmenetzen anhand von Daten der Forschungsmesstrecke Chemnitz sowie der Praxispartner.
- zur Simulation der (Rest-)Nutzungsdauer von Fernwärmeleitungen unter Berücksichtigung von Echtzeitdaten und zukünftigen Betriebsweisen des Wärmenetzes.
- zur Erarbeitung, Implementierung und Validierung von Nachhaltigkeitskriterien und Kennzahlen („Key Performance Indicator“) für Fernwärmeleitungen in Asset Management Simulationsmodellen.
- zur Anwendung der Projektergebnisse in der Praxis (Umsetzung bei den Praxispartnern), als Grundlage für eine beschleunigte Migration der benötigten wissenschaftlichen Erkenntnisse in die relevanten Normen.
- im Rahmen der internationalen Kooperation, um einerseits bestmögliche, nationale Ergebnisse und anderseits gemeinsame internationale Ziele zeit- bzw. ressourceneffizient erreichen zu können.

In der ersten Phase des Forschungsvorhabens haben sich die Verbundpartner mit den Grundlagen des Asset Managements im Bereich Fernwärme (Kapitel 1.3) sowie der vorhandenen Fachliteratur zu den Entwicklungen in den Bereichen vorausschauende Instandhaltung (Kapitel 2) und Nachhaltigkeitskriterien für leitungsgebundene Infrastruktur (Kapitel 3) auseinandergesetzt. Die Ergebnisse dieser Recherche bildeten den Ausgangspunkt für die Erstellung eines Kriterienkatalogs für die Algorithmus Entwicklung im Projekt (Kapitel 4). Zusätzlich wurden Bewertungsansätze und Kriterien (Key Performance Indicator) für das Asset Management abgeleitet und entwickelt Kapitel 5). Mit der

Veröffentlichung dieser umfangreichen Ergebnisse streben die Forschungspartner deren Verbreitung in die wissenschaftliche und praktische Fachwelt an.

1.1 Motivation für Sustainable Asset Management im Bereich Fernwärme

Autor: Stefan Hay, Tillmann Deselaers

Bei der Umsetzung der Wärmewende stehen Fernwärmeversorgungsunternehmen vor enormen Herausforderungen, die aus politischen, technischen, wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Anforderungen resultieren. Dabei bilden die bestehenden Fernwärmesysteme und insbesondere die **bestehenden Wärmenetze** in vielen Städten in Deutschland **das Fundament der zukünftig klimaneutralen Fernwärmeversorgung.**

Jedes Fernwärmesystem in Deutschland besitzt eine individuelle Charakteristik, die durch lokale Rahmenbedingungen und städtebauliche Entwicklung entstanden ist. Die Einzigartigkeit eines Fernwärmesystems zeigt sich in den technischen Parametern, wie bspw. der Betriebstemperatur (bzw. Auslegungstemperatur) und dem Betriebsdruck oder den unterschiedlichen Werkstoffen der eingesetzten Rohrsysteme.

Die Erreichung der energiepolitischen Ziele der Bundesregierung erfordert die Dekarbonisierung, die Transformation und den massiven Ausbau dieser Fernwärmesysteme. Eine Voraussetzung hierfür ist die **Aufrechterhaltung der Wärmeversorgung während des Transformationsprozesses**, die von zuverlässigen Abschätzungen der Alterungsprozesse in den Fernwärmeleitungen und gezielten Instandhaltungsstrategien beeinflusst werden kann. Gleichermaßen kann die Frage nach dem richtigen Transformationspfad und den geeigneten Investitionszeitpunkten in die bestehenden Wärmenetze **nicht ohne genaue Kenntnis über die Alterungsvorgänge in Wärmenetzen beantwortet werden**.

Im Zusammenhang steigen sowohl die Bedeutung als auch die Anforderungen an Asset Management Simulationen: Neben den zuverlässigen Prognosen der Nutzungsdauer als Grundlage gezielter Instandhaltungsstrategien zur Aufrechterhaltung der Versorgungssicherheit, müssen bspw. auch die Auswirkungen veränderter Fahrweisen bewertet werden. Wertvolles Werkzeug wird dabei zukünftig die **Digitalisierung von Fernwärmesystemen** sein, deren **Potenziale für das Asset Management** in der Fernwärme durch die wissenschaftlichen Weiterentwicklungen bestehender Nutzungsdauermodelle und Software-Tools erschlossen werden müssen.

Neben der Bewertung wirtschaftlicher und versorgungstechnischer Kriterien ist als weiterer Trend im Infrastrukturbau ein zunehmendes Bewusstsein hinsichtlich der **Ökobilanzierung von Baumaßnahmen und Materialien** zu verzeichnen. Während in anderen Bereichen der leitungsgebundenen Infrastruktur die Kenntnisse in Bezug auf die Nachhaltigkeit, die Ökobilanzierung oder den Einsatz von KI-Modellen bereits fortgeschritten sind, müssen diese in der Fernwärme noch entwickelt werden. Im Bereich Fernwärme ist es erforderlich das bestehende Wissen zusammenzutragen, geeignete Kriterien zu erarbeiten, messbare Kennzahlen zu generieren und diese mit den Erfahrungen der Praxis zu kombinieren. Das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz geförderte Forschungsvorhaben „SAM-FW“ schafft in der ersten Projektphase die Grundlage für die Entwicklung von Algorithmen bzw. KI-basierten Modellen für das zukünftig Sustainable Asset Management im Bereich Fernwärme. Diese sind als Ergebnisse in dieser Veröffentlichung dargestellt.

1.2 Begriffe und Definitionen

Autoren: Pakdad Langroudi, Stefan Dollhopf, Ingo Kropp, Maria Schwarze, Tillmann Deselaers, Stefan Hay, Dennis Lottis und Holger Dittmer

1.2.1 Asset Management bzw. Instandhaltungsstrategien Wärmenetze

Unter den Begriff Asset Management werden koordinierte Aktivitäten einer Organisation zusammengefasst, die dazu dienen mit ihren Vermögenswerten, z. B. Betriebsmittel wie Rohrleitungen, Werte zu schaffen, zu erhalten und Ziele der Organisation zu erreichen (DIN ISO 55000). Im Bereich Fernwärme bedeutet dies insbesondere die Versorgungssicherheit und die Versorgungsqualität der Wärmeversorgung aufrecht zu erhalten sowie die Funktionsfähigkeit der entsprechenden Betriebsmittel zu gewährleisten.

Als internationaler Standard für das Asset Management gilt die ISO-Reihe 55000ff als Norm für kapitalintensive Infrastrukturunternehmen, die den Rahmen für weitere branchenspezifische Normen und Regelwerke bildet. DIN ISO 55000 enthält eine Übersicht, Leitlinien und Begriffe. DIN ISO 55001 beschreibt Anforderungen an entsprechende Managementsysteme. In DIN ISO 55002 werden Empfehlungen für die Anwendung der DIN ISO 55001 in einem Leitfaden gegeben. In Deutschland sind branchenspezifische Normen im Regelwerk des AGFW enthalten. Neben der AGFW FW 113 (2017) und AGFW FW 114 (2013), die die Versorgungsqualität und Mindestanforderungen für Asset Management in der Fernwärmebranche darstellen, können die Normen zur Auslegung und Betrieb des Wärmenetzes wie u. a. AGFW FW 401 (2021), AGFW FW 410 (2011), AGFW FW 411 (2019), AGFW FW 435 (2023) oder AGFW FW 442 (2011) für Aspekte zur Einschätzung des Lebenszyklus herangezogen werden.

„Instandhaltung sind alle planmäßigen und außerplanmäßigen Maßnahmen zur Bewahrung und Wiederherstellung der Funktionsfähigkeit sowie zur Feststellung und Beurteilung des Ist-Zustandes sowie zur Bewahrung und Wiederherstellung des Soll-Zustandes (AGFW FW 114, 2013)“ eines Betriebsgutes, z. B. einer Rohrleitung in einem Wärmenetz. Grundsätzlich werden Instandhaltungsmaßnahmen in reaktive und pro-aktive Maßnahmen sowie Wartung, Inspektion, Instandsetzung und Verbesserung unterschieden. Darauf aufbauende Grundstrategien der Instandhaltung können entweder der Schadensbeseitigung oder der Schadensvorbeugung dienen (AGFW FW 114, 2013). Außerdem werden die Wechselwirkungen und Abgrenzungen verwandter Begriffe wie z.B. „Wartung, Inspektion, Instandsetzung, etc.“ erläutert. Abbildung 1 grenzt verschiedene Begriffe der Instandhaltung voneinander ab. Nahezu identische Definitionen von Instandhaltung und weiterer Begriffe finden sich auch in DIN 31051 (2019) und DIN EN 13306 (2018).

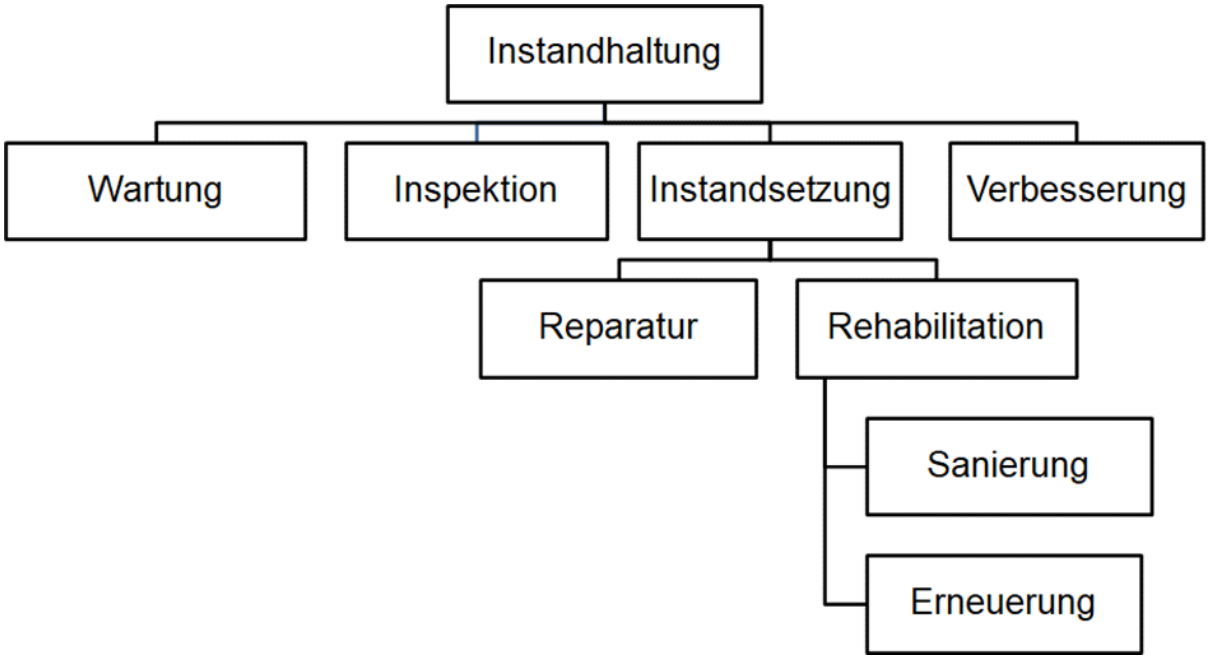


Abbildung 1: Einteilung von Instandhaltungsmaßnahmen, Quelle: AGFW FW 114 (2013)

1.2.2 Schaden

Gemäß AGFW Regelwerk FW 114 ist ein Schaden die Beendigung der Fähigkeit eines Betriebsmittels, eine geforderte Funktion zu erfüllen. Dabei ist es nicht maßgeblich, wie sich die Beeinträchtigung der Funktionsfähigkeit auf den Betrieb des Wärmenetzes auswirkt, also ob es zu einem Austritt des Heizmediums kommt oder nicht. Weitere Informationen und Hilfestellung zur Einordnung sowie Dokumentation von Schäden sind in AGFW FW 114 (2013) bzw. in der AGFW Bestands- und Schadensdatenbank dargestellt.

1.2.3 Vorausschauende Instandhaltung

Gemäß der DIN EN 13306 (2018) wurde der Begriff „Predictive Maintenance“ als „Voraussagende Instandhaltung“ übersetzt. Im Gegensatz zur englischen Bezeichnung werden in der Industrie, Fachzeitschriften und der akademischen Literatur jedoch verschiedene Übersetzungen verwendet, wie „Vorausschauende Instandhaltung“, „Vorausschauende Wartung“ sowie „prädiktive Instandhaltung“. Der Begriff „Vorausschauende Instandhaltung“ wird allerdings in der Literatur häufiger verwendet. Daher wird in dieser Studie dieser Begriff im weiteren Verlauf des Dokuments verwendet.

Die vorausschauende Instandhaltung, wie sie in der DIN EN 13306 (2018) beschrieben ist, bezieht sich auf zustandsbasierte Wartungsaktivitäten, die auf Prognosen beruhen, welche aus einer kontinuierlichen Überwachung sowie Analyse und Auswertung von Zuständen im Hinblick auf die Abnutzung von Systemkomponenten abgeleitet werden. Im Kontext von Fernwärmesystemen umfasst die vorausschauende Instandhaltung den Einsatz fortschrittlicher Techniken wie sensorgestützte Überwachung, Datenanalyse und maschinelles Lernen, um die verbleibende Nutzungsdauer und potenzielle Ausfallpunkte von Fernwärmeleitungen vorherzusagen. Durch die kontinuierliche Beurteilung des Zustands der Fernwärmeleitungen mithilfe von Sensoren, die Parameter wie Temperatur, Druck, Durchflussraten und Korrosionsniveaus messen, ermöglicht die vorausschauende Instandhaltung den Betreibern, Echtzeit-Einblicke in die Funktionsweise des Systems zu

erhalten. Diese Sensoren werden an strategischen Stellen entlang des Rohrleitungsnetzes platziert und liefern Daten, die für fundierte Entscheidungen von entscheidender Bedeutung sind.

Die prädiktiven Modelle, die auf historischen Leistungsdaten und laufenden Messungen basieren, helfen dabei, Muster und Trends zu identifizieren, die auf die Wahrscheinlichkeit zukünftiger Ausfälle oder Systemverschlechterungen hinweisen. Dies ermöglicht die Prognose potenzieller Probleme wie Rohrbrüche, Lecks oder den Beginn von Korrosion, bevor sie auftreten. Durch den Wechsel von ereignisorientierter und periodischer Instandhaltung zu einem dynamischeren, datengestützten Ansatz kann die Instandhaltung zielgerichtet geplant werden. Dies optimiert die Ressourcenzuweisung und reduziert unnötige Instandhaltungsmaßnahmen. Dieser Ansatz spielt auch eine entscheidende Rolle bei der Minimierung ungeplanter Ausfallzeiten, was für Fernwärmesysteme besonders wichtig ist, da Versorgungsunterbrechungen eine große Anzahl von Haushalten und Unternehmen betreffen können.

Darüber hinaus trägt die vorausschauende Instandhaltung zur Langlebigkeit der Infrastruktur bei, indem sie die rechtzeitige Erkennung von Problemen ermöglicht, die ansonsten Notfallreparaturen erfordern würden. Die frühzeitige Identifizierung potenzieller Ausfälle erlaubt es den Betreibern, Probleme zu beheben, bevor sie eskalieren, wodurch die Lebensdauer der Rohre verlängert und die Gesamt-Nachhaltigkeit des Fernwärmesystems verbessert wird. Im Wesentlichen ermöglicht die vorausschauende Instandhaltung den Betreibern von Fernwärmesystemen, datengestützte Entscheidungen zu treffen, die die Zuverlässigkeit und Effizienz ihrer Netze verbessern und die kontinuierliche und unterbrechungsfreie Bereitstellung von Wärmedienstleistungen für die Verbraucher sicherstellen.

1.2.4 Der Nachhaltigkeitsbegriff

Nachhaltigkeit bezieht sich auf die Fähigkeit, die Bedürfnisse der Gegenwart zu erfüllen, ohne die Möglichkeit künftiger Generationen zu beeinträchtigen, ihre eigenen Bedürfnisse zu erfüllen. Das Konzept fand zuerst in der Forstwirtschaft Anwendung als "forstwirtschaftliches Prinzip, nach dem nicht mehr Holz gefällt werden darf, als jeweils nachwachsen kann" (Duden.de, 2024).

Besondere Relevanz in Deutschland erhielt das Konzept 1998 durch den Abschlussbericht der vom Deutschen Bundestag einberufenen Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt - Ziele und Rahmenbedingungen einer nachhaltig zukunftsverträglichen Entwicklung" (Drucksache 13/11200). Dort ist eine Strategie für eine nachhaltige Entwicklung in Deutschland formuliert, die seitdem als fester Bestandteil in relevanten, gesetzlichen Rahmenbedingungen umgesetzt ist. Diese Strategie, bekannt als die "Drei-Säulen-Modell" der Nachhaltigkeit, besteht aus **ökonomischer** Leistungsfähigkeit, **ökologischer** Verträglichkeit und **sozialer** Gerechtigkeit. Das Ziel ist es, eine Balance zwischen diesen drei Säulen zu finden, um eine dauerhafte und gerechte Entwicklung zu gewährleisten. In den nachfolgenden Ausführungen wird der Begriff "Nachhaltigkeit" in diesem Bedeutungsrahmen verwendet.

1.2.5 Kennzahlen

Die Unternehmensleistung anhand von Kennzahlen zu messen, ermöglicht eine fundierte Entwicklung von Unternehmensstrategie und die nachträgliche Bewertung von deren Erfolg. Der Bewertungsmaßstab sind dabei messbare Unternehmensziele, wie z. B. die Steigerung

der Verfügbarkeit einer Erzeugungsanlage auf 95 % bis zum Jahresabschluss. Die Erreichung der Unternehmensziele hängt i. d. R. von mehreren Faktoren ab. Der Begriff Leistungskennzahl (*Key Performance Indicator*, KPI) bezieht sich auf Faktoren mit wesentlichem Einfluss auf einzelne Unternehmensziele (Neely1997).

Eine Kennzahl konzentriert quantitativ erfassbare Werte und verdichtet somit das Wissen über reale Sachverhalte. Dadurch können komplexe Sachverhalte schnell erfassbar gemacht und veranschaulicht werden. Besonderen Nutzen bieten Kennzahlen bei einem Vergleich mit vergangenen Werten (Erkennung von Entwicklungen) und Zielwerten und werden daher zur Analyse, Steuerung (ggf. Prognose) und Kontrolle verwendet.

In SAM-FW beziehen sich die Kennzahlen auf die Rohrleitungen eines Fernwärmeverteilungsnetzes.

1.3 Asset Management Fernwärmenetze heute

Autoren: Stefan Hay, Tillmann Deselaers, Dennis Lottis und Holger Dittmer

1.3.1 Technische Hintergründe Fernwärmenetze

Autoren: Stefan Hay, Tillmann Deselaers

Bei Fernwärmenetzen handelt es sich um eine Infrastruktur, die sich bisher insbesondere im urbanen Raum bedarfsgerecht anhand lokaler, spezifischer Anforderungen (technisch, wirtschaftlich, politisch) entwickelt hat. Fernwärmeleitungen in Fernwärmesystemen bestehen meist aus einem Verbund von Rohrleitungen, Dämmstoffen, einer Ummantelung und ggf. Sensorik z.B. zur Detektion von Leckagen. Die Verlegearten und Komplexität von Wärmenetzen kann dabei abhängig von den örtlichen Gegebenheiten, der Anzahl an Wärmeabnehmern, der anlagentechnischen Konfiguration des Wärmeabnehmers, den Gebäudeeigenschaften, dem Nutzerverhalten und des Wärmebereitstellungsparks variieren. Wärmenetze stellen damit das Bindeglied zwischen den Wärmebereitstellungsanlagen und den Wärmeabnehmern dar und können je nach Versorgungsgebiet unterschiedlich sein. Um diese individuellen Anforderungen gerecht zu werden, können auf Basis der Verordnung über Allgemeine Bedingungen für die Versorgung mit Fernwärme AVBFernwärmeV (1980) z.B. technische Anschlussbedingungen für das jeweilige Versorgungsgebiet bereitgestellt werden. Aus diesen technischen Anschlussbedingungen können z.B. Anforderungen und Spezifikationen für die Anbindung von Wärmeabnehmern an das Rohrleitungssystem hervorgehen. Neben den Anschlussbedingungen sind z.B. in (Vattenfall Wärme Berlin AG, 2024), (Hamburger Energiewerke GmbH, 2024), (Fernheizwerk Neukölln Aktiengesellschaft, 2000) und (BTB, 2018) unterschiedliche Systemtemperaturen für das jeweilige Wärmenetz und Wärmeabnehmer enthalten.

Auch im Asset Management des Fernwärmenetzes spiegelt sich diese individuelle Charakteristik des Wärmenetzes anhand der eingesetzten Rohrsysteme wider, die exemplarisch für 14 Wärmenetze in Abbildung 2 dargestellt sind. In Verbindung damit gibt Tabelle 1 einen Überblick über derzeit eingesetzte Rohrsysteme, Werkstoffe, Auslegungsparameter und relevante Normen.

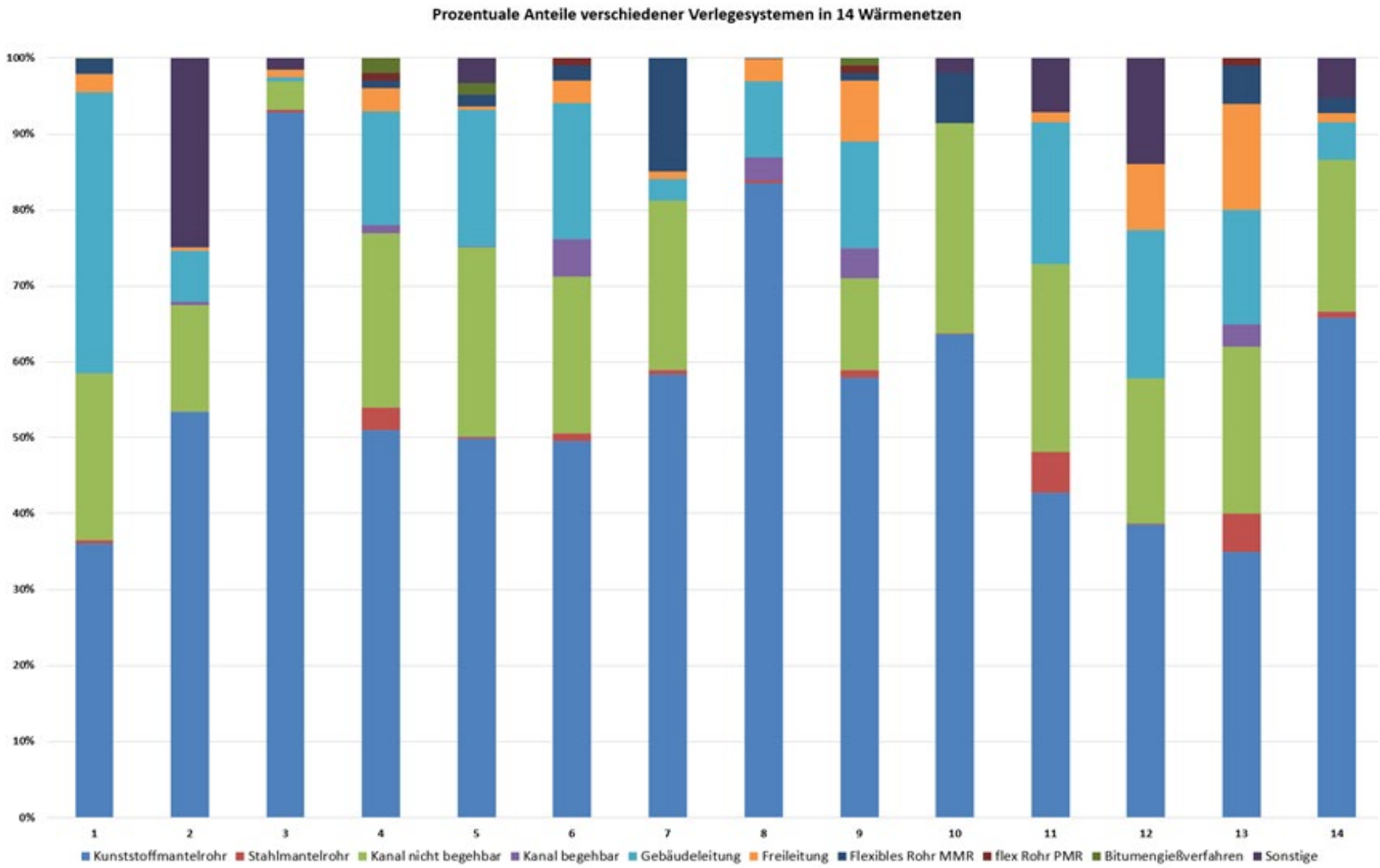


Abbildung 2: Prozentualer Anteil verschiedener Rohrsysteme in 14 Wärmenetzen in Deutschland, Quelle: AGFW auf Basis von Instandhaltung-FW & SAM-FW

Tabelle 1: Übersicht über verschiedene Verlegesysteme, deren Auslegungsparameter, Werkstoffe, Nutzungsdauer sowie normative Verweise

Verlegesystem	Betriebs-temperatur [°C]	Betriebs-druck [bar]	Nutzungs-dauer [a]	Medium-rohr	Wärme-dämmung	Ummantelung	Besonderheiten	Normen
Kunststoff-mantelrohre (KMR)	130 (≤ 140)	Bis PN 25	Min. 30	Stahl	PUR-Hartschaum	Mantelrohr (i.d.R. PE-HD)	Erdverlegt mit direkter Erdauflast; Verbundrohrsystem; Werkseitig gedämmt	EN 13941 FW 401 EN 253 EN 448 EN 489-1 EN 14419 EN 15698 EN 17248
Kanalsysteme	130 (≤ 140)	Bis PN 25	Min. 30	Stahl	Matten oder Schalen aus Mineralwolle	Verschiedene Materialien (Dachpappe, Blech)	Erdverlegt ohne direkte Erdauflast; freidehnendes Stahlmediumrohr, Lagerkonstruktionen und Kompensationselemente i.d.R. Betonfertigteile; keine Standardisierung, verschiedene Ausführungen; Kanalhaube: Betonfertigteil, Schutz der Fernwärmeleitungen vor äußeren Einwirkungen	k. A.
Stahlmantel-rohre (SMR)	Bis 400	PN 64	Min. 50	Stahl	Ringraum mit Mineralwolle i.d.R. mit Vakuum	Stahl, Mantelrohr-umhüllung: aus Polyethylen, Bitumen, Farbbeschichtung	neben technischen Parametern, werden SMR häufig auch für Transportleitungen eingesetzt, sowohl	FW410 in FW 410 ist eine detaillierte Auflistung der

Verlegesystem	Betriebs-temperatur [°C]	Betriebs-druck [bar]	Nutzungs-dauer [a]	Medium-rohr	Wärme-dämmung	Ummantelung	Besonderheiten	Normen
						(passiver Korrosionsschutz)	erdverlegt als auch als Freileitungen	normativen Verweise enthalten
Flexible Rohrsysteme (*)	Werkstoffab-hängig <95…115	Werkstoffab-hängig <6…10	Min. 30	Verschiedene (siehe unten)				FW 420 Teil 1-5
(*) mit faser-verstärktem Kunststoff-mediumrohr	< 115	< PN 16	Min. 30	PE-Xa verstärkt durch Fasergeflecht aus Aramid	Sauerstoff Diffusionssperre, PUR-Hartschaum	Konturiertes Mantelrohr aus Polymer aus PE-LD	Erdverlegt mit direkter Erdauflast; Verbundrohrsystem; Werkseitig gedämmt; durch Faserverstärkung höhere Betriebsdrücke / -temperaturen möglich	FW 420 Teil1 FW 420 Teil 5 EN 15632
(*) mit Kunststoff-mediumrohr	< 95 80..90	<6..10	Min. 30	**PE-X** SDR 11 SDR 9 SDR 7, 4 **PB-1** SDR 3, SDR 6, SDR 11, SDR 9	EVOH-Sperrschicht, PUR-Hartschaum oder Polyolefin-Schaumstoff	Glatt oder konturiertes Mantelrohr aus Polymer	Erdverlegt mit direkter Erdauflast; Werkseitig gedämmt; als Verbundrohrsystem und als nicht-Verbundrohrsystem ausgeführt	FW 420 Teil 1 FW 420 Teil 5 EN 15632-2 EN 15632-3 EN ISO 13670 DIN16892 DIN 16893
(*) mit Stahl-mediumrohr	≤ 130	Bis PN 25	Min. 30	Stahl	PUR-Hartschaum, PIR-Hartschaum	PE-LD	Erdverlegt mit direkter Erdauflast; Verbundrohrsystem;	FW 420 Teil 2

Verlegesystem	Betriebs-temperatur [°C]	Betriebs-druck [bar]	Nutzungs-dauer [a]	Medium-rohr	Wärme-dämmung	Ummantelung	Besonderheiten	Normen
							Werkseitig gedämmt;	FW 420 Teil 5 EN 15632-4
(*) mit Edelstahl-mediumrohr	≤ 150	Bis PN 25	Min. 30	Edelstahl	PUR-Hartschaum, PIR-Hartschaum	PE-LD	Erdverlegt mit direkter Erdauflast; Verbundrohrsystem; werkseitig gedämmt;	FW 420 Teil 3 FW 420 Teil 5 EN 15632-4
Frei-& Gebäude-leitungen	Abhängig von den Betriebs-temperaturen des Gesamtnetzes	Bis PN 25	Min. 50	KMR SMR Wickelfalz-rohre (Stahl) Stahl	s. o. s. o. PUR-Hartschaum Faserdämmstoff aus Mineralwolle, PUR-Hartschaum, PIR-Hartschaum	s. o. s. o. Blech Schutz, auf Einflüsse abzustimmen	Visuelle Inspektion durch Begehung möglich; Betriebsbedingungen bei Gebäudeleitungen für lange Nutzungsdauer günstige	s. o. s. o. FW 411 In FW 411 ist eine detaillierte Auflistung der normativen Verweise enthalten

1.3.2 Grundlagen des Asset Management von Fernwärmeleitungen

Autoren: Dennis Lottis, Holger Dittmer und Stefan Hay

Nach DIN EN 13306 (2018) folgt eine Instandhaltungsstrategie, den nachfolgenden Hauptzielsetzungen. Dabei versteht man unter dem Begriff der Instandhaltungsstrategie die Vorgehensweise des Managements zur Erreichung der Instandhaltungsziele.

Hauptzielsetzung DIN EN 13306 (2018):

- *„die Sicherung der Verfügbarkeit der Einheit in der geforderten Funktion zu günstigsten Kosten;“*
- *„die Beachtung der mit der Einheit einhergehenden Sicherheits- und aller anderen obligatorischen Anforderungen;“*
- *„die Beachtung aller Einflüsse auf die Umwelt;“*
- *„die Aufrechterhaltung der Haltbarkeit der Einheit und/oder der Qualität der gelieferten Produkte oder der erhaltenen Dienstleistung, wenn notwendige, unter Beachtung der Kosten.“*
- *Eine detaillierte Übersicht der verschiedenen Instandhaltungsarten bzw. Begrifflichkeiten gemäß* DIN EN 13306 (2018) *zeigt* Abbildung 3

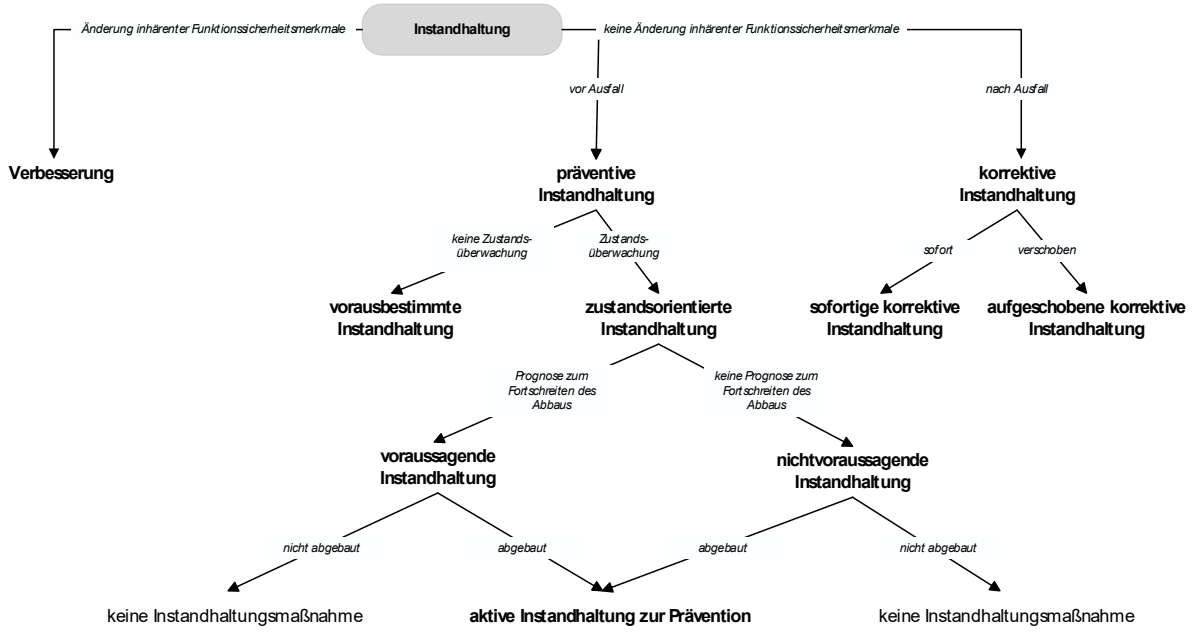


Abbildung 3 Gesamtübersicht der Instandhaltungsarten (DIN EN 13306:2018)

Abbildung 3 verdeutlich die verschiedenen Instandhaltungsarten, die im Rahmen einer Instandhaltung eintreten können. Eine Instandhaltung, bei der z.B. keine Änderung inhärenter Funktionssicherheitsmerkmale vor dem Ausfall erfolgt, wird nach (DIN EN 13306:2018) als präventive Instandhaltung bezeichnet. Berücksichtigt eine präventive Instandhaltung eine Zustandsüberwachung wird diese als zustandsorientierte Instandhaltung beschrieben. Eine

zustandsorientierte Instandhaltung, die z.B. eine Prognose zum Fortschreiten des Abbaus beinhaltet, wird als vorausschauende Instandhaltung bezeichnet.

In der Fernwärme kommen auch risikoorientierte Instandhaltung Strategien zum Einsatz. Dabei wird das Risiko eines Schadensereignissen und dessen Bedeutung für die Versorgungszuverlässigkeit des Wärmenetzes anhand festgelegter, individueller Kriterien durch das Versorgungsunternehmen bewertet. Vorteil der risikoorientierten Instandhaltung ist, dass bewusst Elemente der Schadensvorbeugung bzw. der Schadensbeseitigung ausgewählt werden und somit die Vorteile beider Grundstrategien gezielt genutzt werden können (AGFW FW 114, 2013).

Je nach Instandhaltungsart können unterschiedliche Instandhaltungstätigkeiten bei einer Instandhaltungsmaßnahme erforderlich sein. Abbildung 4 gibt einen detaillierten Überblick von möglichen Instandhaltungstätigkeiten.

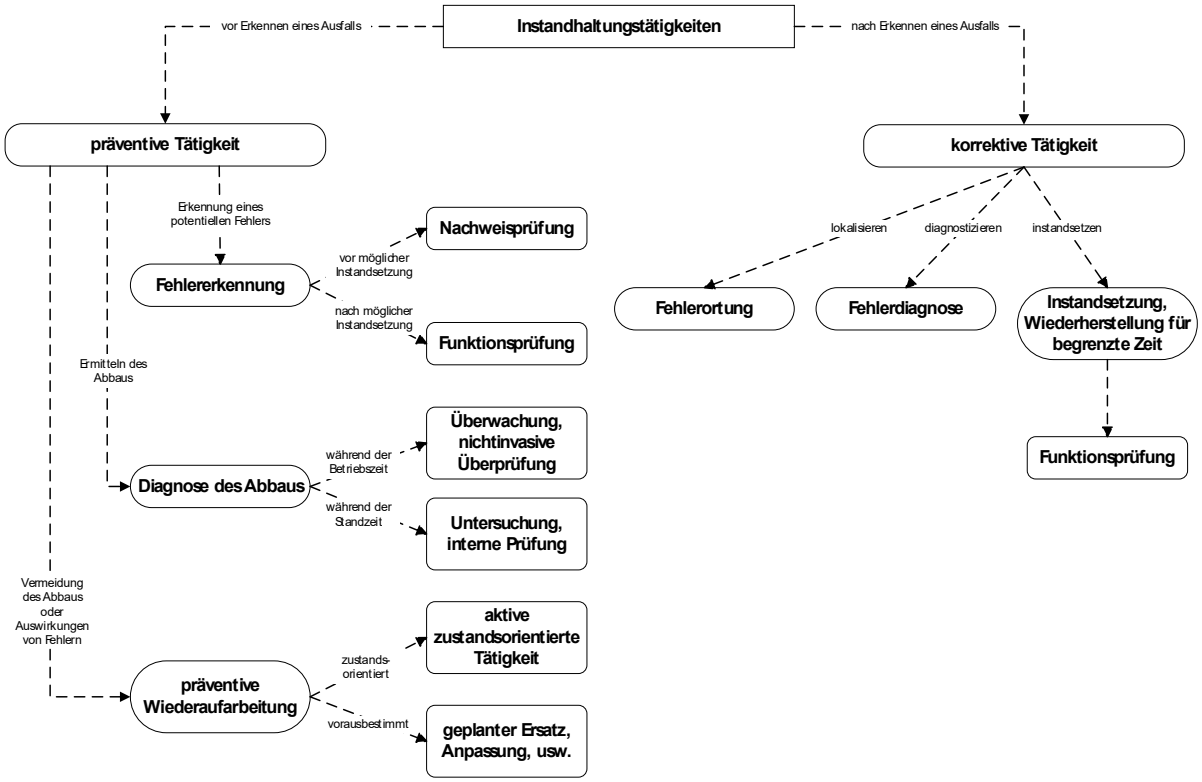


Abbildung 4: Instandhaltungstätigkeiten (DIN EN 13306:2018)

Eine Instandhaltungstätigkeit, die vor Erkennen eines Ausfalls erfolgt, wird als präventive Tätigkeit definiert. Wird dort ein potenzieller Fehler erkannt, wird dieses als Fehlererkennung beschrieben, nach einer möglichen Instandsetzung dieses Fehlers erfolgt meistens eine Funktionsprüfung (vgl. Abbildung 4).

Abbildung 3 und Abbildung 4 verdeutlichen die Komplexität von Instandhaltungen und Tätigkeiten, die z.B. abhängig von der Art (analog, digital), dem Detaillierungsgrad der Informationsdaten und der jeweiligen technischen Einheit sein können.

Ein weiterer wichtiger Begriff ist die „technische Nutzungsdauer“, welche laut AGFW FW 114 (2013) definiert ist als „die Nutzungsdauer eines Bauteils aus versorgungs-, sicherheits-

und/oder bautechnischen Gründen von der Inbetriebnahme bis zum Zeitpunkt des Versagens.“ Gemäß dieser Definition handelt es sich hierbei um eine Größe, welche für die Wahl einer Instandhaltungsstrategie von großer Bedeutung sein kann. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die technische Nutzungsdauer von Rohrleitungen in Wärmenetzen überwiegend von der Qualität der Fertigung im Werk, der Qualität der Ausführungen im Rohrleitungsbau auf der Baustelle und den Beanspruchungen der Werkstoffe sowie den ggf. zusätzlich wirkenden lokalen Bedingungen im Betrieb beeinflusst wird.

Für Asset Management Simulationen von Fernwärmenetzen gibt es computergestützte Softwareprogramme, die Bestands-, Betriebs- und Schadensdaten nutzen, um Instandhaltungsstrategien für das Wärmenetz zu entwickeln sowie Budgetplanungen für Rehabilitationsmaßnahmen vorzunehmen (AGFW FW 114, 2013) (Hay et al., 2022a). Die Ermittlung von netzspezifischen Schadensraten unter Berücksichtigung geeigneter Alterungsmodelle, in die unter anderen die Einflüsse der Qualität bei der Fertigung im Werk und dem Rohrleitungsbau auf der Baustelle einfließen, könnten somit in der Rehabilitationsplanung berücksichtig werden. Die Alterungsprozesse der Werkstoffe der verschiedenen Rohrsysteme können anhand der Betriebsdaten unter Verwendung von materialbasierten Nutzungsdauermodellen abgeschätzt werden (Hay et al., 2022a). Abbildung 5 stellt exemplarisch diese Zusammenhänge dar und zeigt, wie die Einflüsse auf die technische Nutzungsdauer des erdverlegten Kunststoffmantelrohres im Asset Management berücksichtigt werden können.



Abbildung 5: Einflüsse auf die technische Nutzungsdauer von Wärmenetzen

Im Kontext der Rohrleitungen von Wärmenetzen können gemäß AGFW FW 114 (2013) neben unterschiedlichen Rohrleitungssystemen auch die Verlegeart der Fernwärmetrasse ein wichtiger Aspekt sein. Auf Basis einer Umfrage von Experten wurden in AGFW FW 114 (2013) die branchenübliche, erwartete technische Nutzungsdauern abgeschätzt. Diese sind in nachstehender Abbildung 6 ersichtlich.

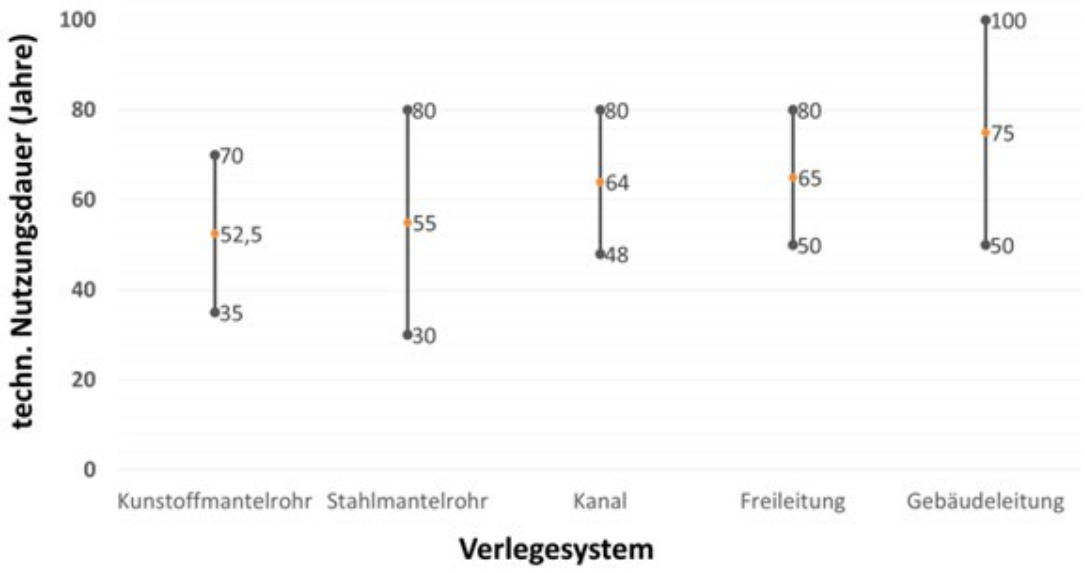


Abbildung 6: Erwartete technische Nutzungsdauer von Rohrleitungssystemen nach AGFW FW114 (2013)

Die Zeitspanne zwischen der minimalen und maximalen, erwarteten mittleren technischen Nutzungsdauer in Abbildung 6, die für einzelne Rohrsysteme bis zu 50 Jahre beträgt, kann insbesondere für die Planung von Budgets für Rehabilitationsmaßnahmen von Versorgungsunternehmen eine Herausforderung sein. Zusätzlich sind im Asset Management Anforderungen an Bestands-, Betriebs- und Schadensdaten zu erfüllen, um die Zuverlässigkeit der Prognosen zu erhöhen und gezielte Instandhaltungsstrategien einsetzen zu können. Neben den in (Hay et al., 2022a) beschriebenen Mindestanforderungen an Bestands-, Schadens- und Betriebsdaten bietet die Bestands- und Schadensdatenbank des AGFW Asset Managern methodische Ansätze zur Etablierung und Verbesserung des Asset Management von Wärmenetzen (Hay et al., 2022a). Da insbesondere historische Betriebs- und Schadensdaten oftmals nur unzureichend erfasst wurden, können die Toleranzen der Prognose von statistischen Alterungsmodellen verhältnismäßig groß sein. Für die Verbesserung des Asset Management von Wärmenetzen ist es daher wichtig, Bestands-, Schadens- und Betriebsdaten sorgfältig zu erfassen und dadurch die Zuverlässigkeit von statistischen Alterungsmodellen zu erhöhen. Dazu kann auch die Beteiligung an der Branchenstatistik (Bestands- und Schadensdatenbank) des AGFW beitragen, da eigene Statistiken mit Daten der Branche angereichert werden können (Hay et al., 2022a).

Des Weiteren können präventive Instandhaltungsstrategien eingesetzt werden, um die erwartete Nutzungsdauer einzelner Rohrsysteme vgl. Abbildung 6 weitere zu präzisieren. Dabei ist zu berücksichtigen, dass viele der heute eingesetzten Rohrsystem in der Erde verlegt sind und bspw. eine visuelle Zustandserfassung nur mit großem technischem und finanziellem Aufwand möglich ist. Ein vielversprechender Ansatz die technische Nutzungsdauer insbesondere erdverlegter Rohrsysteme abzuschätzen, ist die Anwendung materialbasierter Nutzungsdauermodelle. Neben der Vielzahl von Rohrsystemen in einzelnen Wärmenetzen (vgl. Abbildung 2) und den daraus resultierenden verschiedenen materialbasierten Nutzungsdauermodellen, erfordern zuverlässige Prognosen in diesen Nutzungsdauermodellen auch möglichst vollständige Betriebsdaten. Anhand dieser können die Beanspruchungen der Werkstoffe und deren Degradation beschrieben werden. Da Fernwärmeleitungen im Betrieb einer großen Anzahl von Einwirkungen und lokal spezifischen Beanspruchungen ausgesetzt sind, die zum Teil als komplexe Beanspruchungen die Degradation der Werkstoffe beeinflussen, sind die Prognose der Restnutzungsdauer von

Rohrleitungen mit Unsicherheiten belastet [(Hay et al., 2022a)., AGFW (2020a), AGFW (2020b)]. Durch die Anwendung innovativer Ansätze zur Bestimmung des Ist-Zustandes und der Prognose der Restnutzungsdauer sehen u. a Caspar et. al (2023) und Hay et. al (2024) großes Potenzial die Unsicherheiten im Asset Management zu reduzieren. Gleichermaßen werden im Forschungsvorhaben „SAM-FW“ betrieblich gealterte Rohrleitungen untersucht, um die Zuverlässigkeit der Prognose materialbasierter Nutzungsdauermodelle zu verbessern und dadurch die Anforderungen heutiger Asset Managern zu erfüllen.

1.3.3 Die Sicht der Praxis

Autoren: Dennis Lottis und Holger Dittmer

Im Rahmen des Forschungsprojektes „Instandhaltung-FW“ (Hay et al., 2022a) wurden Experteninterviews zur Instandhaltung von Wärmenetzen durchgeführt. Die Ergebnisse dieses Projektes wurden von AGFW in die Befragung des Forschungspartners IEE eingebracht, die die Sicht der Praxis zur Instandhaltung von Wärmenetzen mit den Praxispartnern des Projektes „SAM-FW“ eruiert hat. Nachstehend verdeutlichen die Befragungsergebnisse die heutige Sicht der Praxis zum Asset Management von Fernwärmeleitungen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die nachstehende Darstellung die Ergebnisse aus Umfragen mit insgesamt 14 Versorgungsunternehmen umfasst, deren Anteile verschiedener Rohrsysteme im Wärmenetz in Abbildung 2 dargestellt sind. In Summe ergibt die Gesamttrassenlänge der teilnehmenden Versorgungsunternehmen (neun in (Hay et al., 2022a), zusätzliche fünf in SAM-FW) 5093,2 km. Das durchschnittliche mittlere Netzalter der Rohrsysteme beträgt 21,6 Jahre.

Experteninterviews in SAM-FW: Wie läuft Instandhaltung in der Praxis von Fernwärmenetzbetreibern heute ab? Und was erwarten die Experten für zukünftige Entwicklungen? Diese Fragen standen zu Beginn der Bearbeitung des Projekts „SAM-FW“ für das IEE als Forschungsinstitution im Raum. Schnell wurde klar, dass die Beantwortung in Form einer Literaturrecherche die Gefahr beinhalteten könnte, theoretische Antworten zu finden, die nicht die gelebte Praxis abbilden. Daher fiel die Entscheidung das praktische Wissen direkt von mit den für die Instandhaltung zuständigen Personen bei Netzbetreibern in Form von Experteninterviews abzufragen. Dabei sollte der Fokus vor allem auf Kunststoffmantelrohrsystemen und nicht begehbaren Kanalsystemen liegen. Nachdem die Bereitschaft an der Teilnahme durch die Experten geklärt war, wurden im Vorfeld Leitfragen formuliert, die den Rahmen der Interviews festlegen:

- Wie sind die aktuellen/zukünftig geplanten Betriebsweisen?
- Wie ist die aktuelle/zukünftig geplante Netztopologie?
- Welche Instandhaltungsstrategie und Instandhaltung kommen aktuell zur Anwendung, welche möglichen zukünftigen Entwicklungen sind denkbar?
- Welche Wartungsaktivitäten und -strategien kommen bei unterschiedlichen Rohrtypen und Verlegearten (Fokus auf KMR und nicht begehbaren Kanalsystemen) aktuell zum Einsatz?
- Werden Verfahren wie Wasserbilanzen oder Druckverlustmessungen eingesetzt, um Informationen zur Integrität des Netzes zu erhalten? Wenn ja, gibt hierzu Erfahrungswerte?
- Gibt es Erfahrungswerte bzgl. Alterungs- und Ausfallmechanismen bei unterschiedlichen Rohrtypen bzw. Verlegearten (z.B. Feuchtigkeit im Kanal)?

Die Interviews wurden mit den Experten von drei Netzbetreibern durchgeführt. Dabei war das Format, ein 1,5 Stunden langer virtueller Termin, bei dem die Experten zunächst vor dem Hintergrund der Leitfragen ca. 45 Minuten lang frei von ihren praktischen Alltagserfahrungen berichten konnten. Diese Ausführungen wurden durch Rückfragen der Forschenden ergänzt und protokolliert. In einem zweiten Schritt wurde dann ein Fragebogen durchgesprochen und teilweise gemeinsam ausgefüllt. Dieser Fragebogen wurde im Nachgang an das Interview von den Experten finalisiert und den Forschenden zur Verfügung gestellt.

Für ein gutes Verständnis und die korrekte Einordnung der Ergebnisse ist es erforderlich an dieser Stelle noch auf die Auswertungsmethodiken und die vereinbarten Rahmenbedingungen einzugehen. Grundsätzlich ist dazu festzuhalten, dass es sich bei den erhobenen Daten teilweise um qualitative aber auch um quantitative Daten handelt und, dass für beide unterschiedliche Auswertemethoden verwendet werden müssen. Die Auswertung der quantitativen Daten kommen statistische Analyseverfahren zum Einsatz, während die qualitativen Daten mit dem Auswertungsverfahren des „theoretischen Kodierens“ gemäß (Paperpile, o. D.) analysiert werden. Bei diesem Verfahren werden die Daten auf gemeinsame Begriffe (Codes) abstrahiert und miteinander in Beziehung gesetzt. Dies erlaubt die Erstellung von Begriffsdiagrammen, die es ermöglichen Gemeinsamkeiten aber auch Unterschiede zu identifizieren. Es sei ferner darauf hingewiesen, dass die erhobenen Daten vertraulich behandelt werden müssen. Daher können an dieser Stelle ausschließlich allgemeine Muster und Trends dargelegt werden. Zudem wird in den nachfolgenden Ausführungen auf Vergleichswerte der Fernwärmebranche in Deutschland verwiesen.

Betriebsweise: Alle drei befragten Fernwärmebetreiber arbeiten mit einer außentemperaturgeführten, gleitend-konstanten Fahrweise, bei welcher die durchschnittliche Vorlauftemperatur im Primärnetz bei allen befragten Betreibern im Sommer zwischen 80 und 90 °C liegt und im Winter auf 110 bis 120 °C erhöht wird. Auch die Rücklauftemperaturen variieren saisonal und betragen im Sommer 50 bis 57,5 °C und im Winter 60 bis 62,5 °C. Diese Temperaturen spiegeln die übliche Betriebsweise der Branche wider. Die verwendeten Temperaturen in den Sekundär- und Tertiärnetzen unterscheiden sich jedoch je nach Betreiber, Standort und Jahreszeit. Die Druckstufen der befragten Fernwärmebetreiber liegen bei PN 16 bzw. PN 25. Weitere Gemeinsamkeiten sind die Verwendung von Wasser mit kontrollierter Qualität nach Arbeitsblatt AGFW FW 510 (2022) sowie der Einsatz von KWK- und BHKW- Anlagen bei allen Betreibern zur Erzeugung. Zwei von drei Betreibern nutzen zudem entweder Abwärme aus der Industrie, Solarthermie oder Power-to-Heat-Anlagen, was die Variabilität der Erzeugerstrukturen trotz Gemeinsamkeiten verdeutlicht.

Allgemeine Netzstruktur: Die mittlere Trassenlänge der Fernwärmesysteme der befragten Betreiber beträgt durchschnittlich rund 350 km und liegt unter Durchschnitt von 450 km den AGFW in Hay et al. (2022a) ermittelte. Das durchschnittliche mittlere Netzalter der befragten Betreiber beträgt 25 Jahre und liegt damit etwas über dem Ergebnis mit 21,6 Jahren aller in Abbildung 2 dargestellten Wärmenetze. In der Schadensrate zeigen sich große Unterschiede: Im Durchschnitt beträgt diese bei den befragten Betreibern 0,202 Schäden pro km und Jahr, variiert jedoch stark (zwischen 0,05 und 0,5 Schäden pro km und Jahr). Hier hat sich im Anschluss herausgestellt, dass der Grund für die erheblichen Unterschiede unterschiedliche Definitionen für Schäden darstellen: Teilweise werten die Betreiber ein Ereignis nur als Schaden, wenn Fernwärmewasser ausgetreten ist. Für andere Betreiber werden auch Ereignisse, bei denen Feuchtigkeit von außen eintritt als Schäden definiert. Die mittlere Reha-Rate, die in Hay et al. (2022a) bei etwa 0,4 % pro Jahr lag, liegt bei den befragten Netzen im Mittel bei 0,8% pro Jahr, wobei auch hier große Unterschiede festgestellt wurden, die bisher nicht begründet werden konnten. Der Anteil an koordinierten Baumaßnahmen variiert zwischen 5 % und 20 % und deckt sich im Mittel mit dem Durchschnitt von 15,3 % aus Hay et al. (2022a).

Verlegesysteme: In nachstehender Abbildung 7 sind die durchschnittlichen Anteile der Verlegesysteme der befragten Wärmenetze im Vergleich Durchschnitt der weiteren neun Versorger aus Hay et al. (2022a) dargestellt. Es zeigt sich, dass das Verlegesystem „Kunststoffmantelrohr“ (KMR) bei den befragten Fernwärmebetreibern mit durchschnittlich 59%, wie auch in Hay et al. (2022a) mit ca. 51% das am häufigsten verwendeten Verlegesystem ist. Das Verlegesystem „Kanal nicht begehbar“ ist mit durchschnittlich 11% ebenfalls verbreitet. Der Vergleichswert von ca. 20% spiegelt ebenfalls eine gängige Nutzung dieses Verlegesystems wider. Weitere häufig vorkommende Verlegesysteme sind Freileitungen und Gebäudeleitungen. Da diese beiden Systemen im Allgemeinen Sichtprüfungen möglich sind, was bei den ersten beiden Systemen nicht der Fall ist, lässt sich an dieser Stelle der Fokus auf die Verlegesysteme „KMR“ und „nicht begehbare Kanalsysteme“ für die Instandhaltung begründen.

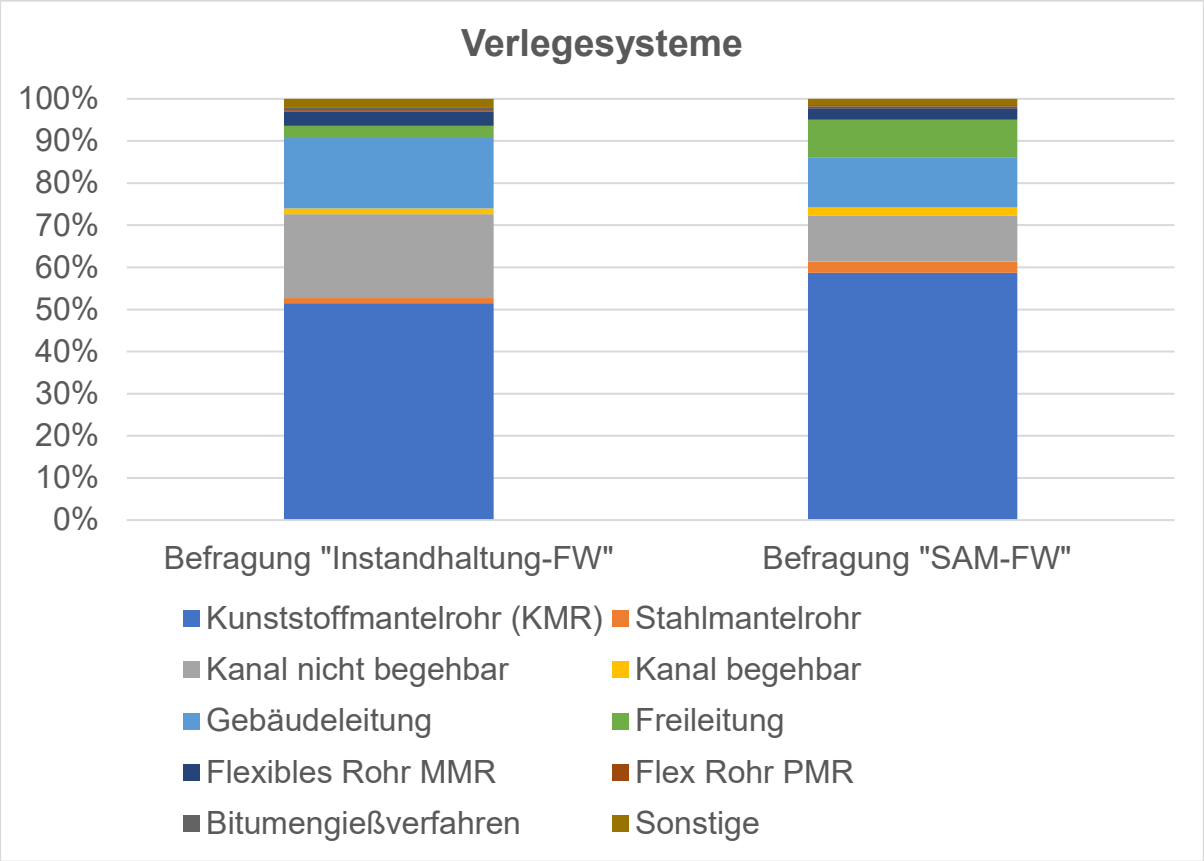


Abbildung 7: Verlegesysteme der befragten Netze im Vergleich zu Befragung in Hay et al. (2022a)

Instandhaltung KMR: Bei der Durchführung der Experteninterview hat sich die große Bedeutung des Verlegesystems KMR bestätigt. Daher ist dieses Verlegesystem auch für die Instandhaltung von herausragender Bedeutung. Zusammenfassend hat sich gezeigt, dass die Netzbetreiber eine risikoorientierte Instandhaltungsstrategie verwenden. Diese beruht meist auf zeitorientierten Inspektions- und Wartungsaktivitäten. Konkretisiert lässt sich die Instandhaltung von KMR damit folgendermaßen beschreiben: Ein großer Teil der KMR-Rohrleitungssysteme verfügt über ein eingebautes Leckageüberwachungs-System. Es handelt sich hierbei um ein Widerstands-Ortungs-Messverfahren bei dem zwei Metalldrähte

aus unterschiedlichem Material (NiCr & Cu) innerhalb der Schaumdämmung verlaufen. Diese werden zu Schleifen innerhalb der Rohrleitungsnetze mit Längen von bis zu 10km verbunden. In regelmäßigen zeitlichen Abständen, z.B. einmal jährlich, führt eine Person Messungen des elektrischen Widerstands dieser Schleifen an festen Messpunkten, die sich i.d.R. in Gebäudekellern oder unterhalb von Straßen befinden, durch. Die gemessenen Werte werden dokumentiert und mit Werten aus der Vergangenheit verglichen. Dadurch lassen sich Veränderungen feststellen und Rückschlüsse auf mögliche Feuchtigkeitseintritte ziehen. Wenn Feuchtigkeit in ein KMR eindringt, sinkt der elektrische Widerstand des Leckageüberwachung. Dies geschieht, weil Wasser die Leitfähigkeit zwischen den Metalldrähten erhöht, und so zu einem niedrigeren Widerstand führt. Darüber hinaus gibt es die Möglichkeit von Drahtabrissen. Wenn es in dem KMR zu einem Drahtabriss kommt, steigt der elektrische Widerstand im Leckageüberwachung. Ein Drahtabriss unterbricht den Stromfluss, wodurch der Widerstand im Stromkreis insgesamt erhöht wird, da es keinen vollständigen Leitungsweg mehr gibt. Wird einer dieser Sachverhalte festgestellt, erfolgt i.d.R. eine genauere Einmessung und damit Lokalisierung und Erkundung der potenziellen Schadstelle und Einschätzung des Ausmaßes. Basierend auf diesen Informationen, Betriebserfahrung, sowie vieler weiteren Kriterien, wie beispielsweise die Relevanz des Rohrleitungsabschnitts oder die Schwierigkeit der Erdarbeiten zur Freilegung, erfolgt dann eine Risikoabschätzung und somit Priorisierung für Reparatur-, Sanierungs- oder Erneuerungsmaßnahmen zur Vermeidung von größeren Störungen. Bemerkenswert erscheint hierbei, dass bis zur Umsetzung der Maßnahmen auf Basis dieser Risikoabschätzung z.T. einige Monate oder Jahre vergehen können, da die befragten Betreiber von einer entsprechenden Anzahl von potenziellen Schadstellen in ihren Netzen wissen. Diese werden nach und nach abgearbeitet aber es kommen auch immer wieder neue hinzu. Die Durchführung einer Reparatur-, Sanierungs- oder Erneuerungsmaßnahme läuft so ab, dass eventuelle Straßen oberhalb des Rohrabschnittes zunächst ganz oder teilweise gesperrt werden müssen, wofür eine Genehmigung erforderlich ist. Dann erfolgt die Freilegung der Rohre durch Tiefbauarbeiten. Anschließend erfolgen spezifische Maßnahmen, wie beispielsweise den Austausch einer Mantelrohrverbindung („Muffe“). Sollte die Sanierung der Leitung erforderlich sein, gehen damit meist Schweißarbeiten am Mediumrohr und damit die Notwendigkeit der zeitweisen Stilllegung des Netzabschnittes einher. Erneuerungen finden bei KMR i.d.R. nur bei Netzerweiterungen oder bei Abschnitten ohne Leckageüberwachung statt. Nach der Durchführung der Maßnahme wird die Baugrube wieder verfüllt und die Geländeoberfläche gemäß den lokalen Anforderungen wieder hergestellt. Wenn es möglich ist, nutzen die Netzbetreiber gerne die Möglichkeit von koordinierten Baumaßnahmen bei denen ebenfalls Arbeiten an anderen Infrastrukturen stattfinden.

Häufige Schäden bei KMR: Aus der Erfahrung heraus berichteten die Interviewpartner vor allem von Feuchteeintrag von außen, der z.B. durch fehlerhafte Abdichtungen an Mantelrohrverbindungen (i.d.R. Schrumpfmuffen mit Abdichtbändern oder Polyethylen-Schweißmuffen), auftrifft. Zudem kommt es durch Fremdeinwirkung zu Schäden am Kunststoffmantel, z.B. durch Baumaßnahmen, und damit zum Eindringen von Wasser. Zum aktuellen Zeitpunkt gibt es bei den Interviewpartnern Bestrebungen die beschriebene Vorgehensweise durch digitale Permanentüberwachungsmaßnahmen der Leckageüberwachung zu ergänzen. In einigen Netzbereichen findet diese aktuell schon statt und es wurde von personellen Entlastungen berichtet.

Instandhaltung nicht begehbarer Kanalsysteme: Auch wenn nicht begehbare Kanalsysteme auf ihren Anteil bezogen auf die Leitungslänger einen deutlich geringeren Anteil als das Verlegesystem KMR aufweisen, so sind sie aus Sicht der Instandhaltung aber ebenso von herausragender Bedeutung. Die Gründe dafür sind, dass diese Verlegesysteme häufig in alten und/oder sehr wichtigen Netzbereichen mit großen Durchmessern, z.B. bei

Transportleitungen, anzutreffen sind. In der Folge wäre hier ein ungeplanter Ausfall mit drastischen Konsequenzen verbunden. Aus den Interviews hat sich ergeben, dass die Netzbetreiber bei diesem Verlegesystem vor allem ereignisorientiert Reparieren, Sanieren und Erneuern. Zu letzterem ist festzuhalten, dass hier ein Großteil der Befragten angegeben habe, einen Austausch im Erneuerungsfall durch KMR-Systeme durchzuführen. Wartungs- und Inspektionsmaßnahmen erfolgen bei allen Betreibern zeitorientiert. Diese Maßnahmen sehen in der konkreten Praxis aber gänzlich unterschiedlich aus als bei den KMR, da bei nicht begehbaren Kanalsystemen, wie der Name schon sagt, der Großteil der Leitungen nicht begangen und daher auch nicht besichtigt werden kann. Die Leitungen starten und enden in (Schacht-) Bauwerken und die Leitungsbereiche innerhalb der Bauwerke sowie die Bauwerke selbst sind daher Gegenstand der regelmäßigen Inspektionsmaßnamen. Diese erfolgen i.d.R. auf jährlicher Basis durch Mitarbeitende der Betreiber anhand einer Checkliste zur subjektiven Zustandsbewertung. Dementsprechend kommt hier viel Experten- und Erfahrungswissen zum Einsatz. Bei den nicht begehbaren Kanalsystemen der Befragten gibt es nur wenig Sensorik und keine Leckageüberwachungssysteme. Nur die allerwichtigsten Netzabschnitte werden z.T. aktuell digital überwacht. Die Überwachung befindet sich aktuell allerdings noch in der Erprobung. Konkret werden beispielsweise akustische Signale an einer Stelle in die Leitung induziert und an einer anderen etwas entfernten Stelle ausgewertet. Hier ist die Erwartungshaltung, Informationen zur Materialstärke des Mediumrohrs zu erhalten. Darüber hinaus gibt es Ansätze zur Temperatur-, Feuchte- und Wasserstandsmessung in den Bauwerken. Ein weiterer Ansatz, von dem berichtet wurde, ist das Befahren der Kanäle mit Robotern. Diese sind mit Lampen und Kameras ausgestattet und geben so die Möglichkeit der visuellen Überprüfung unzugänglicher Abschnitte. Bei den befragten Netzbetreibern konnten auf diese Weise Leitungslängen im mittleren einstelligen Prozentbereich untersucht werden. Damit erscheint das Verfahren vielversprechend, wenn keine anderen Informationen zu einem Abschnitt vorliegen.

Ein weiterer Aspekt, über den in den Interviews gesprochen wurde, waren **Methoden zur Beurteilung der Gesamtnetzintegrität**. Hier gaben alle Versorger an Wasserbilanzen ihrer Netze durchzuführen. Das erfolgt i.d.R. durch Messung der Nachspeisemengen und der Berücksichtigung von thermischen Ausdehnungseffekten sowie von geplanten Entleerungsmaßnahmen von Rohren oder Netzabschnitten. Im Detail kommt auch hier Experten- und Erfahrungswissen zum Einsatz. Dies zeigt sich auch bei der Auswertung, bei der dann unterschiedliche Zielwerte zum Einsatz kommen: So gab es Zielwertangaben mit der Einheit „Kubikmeter pro Tag“ sowie „Netzvolumen pro Jahr“. Ein weiterer Zielwert war ein relativer, also einheitenloser Zahlenwert, welcher aus dem Verhältnis von Nachspeise- zu Netzvolumen bestimmt wurde. Dies lässt auch Unterschiede in der praktischen Verwendung vermuten, wobei alle Netzbetreiber angaben, einen großen Nutzen in Wasserbilanzen zu sehen. Weitere Maßnahmen, von denen berichtet wurde, sind Druckverlustmessungen an den Netzpumpen oder in Teilabschnitten. Diese Verfahren befinden sich z.T. gerade im Aufbau. Darüber hinaus wurde die Befliegung der Netze mit Drohnen, welche mit Wärmebildkameras ausgestattet sind, als Möglichkeit genannt. Zu den beiden zuletzt genannten Maßnahmen liegt kein Fazit zur Effektivität vor.

Zum Abschluss der Interviews wurden die Experten nach ihrer **Einschätzung möglicher zukünftiger Entwicklungen** befragt. Dabei gaben alle an, dass sie eine Absenkung des Temperaturniveaus anstreben. Zudem waren Anpassungen der Netztopologie, beispielsweise zur Entlastung von Hauptleitungen, im Zuge der aktuell hohen Nachfrage bei fast allen Betreibern absehbar. In diesem Zuge wird auch über die Möglichkeit von dezentralen Einspeisungen nachgedacht, wobei hierbei wichtig ist, dass diese die thermischen und hydraulischen Anforderungen der Netze gerecht werden. Zudem gaben einige Betreiber an, zukünftig Schritte hin zu einer präventiven Instandhaltung auf Basis von vermehrtem Einsatz

von digitalen Fernüberwachsmethoden durchführen zu wollen. Hier ist das Ziel Ausfälle zu planbaren Versorgungsunterbrechungen, meist im Sommer, zu machen. Auch werden vereinzelt Tests mit innovativen Ansätzen, wie beispielsweise die Sanierung mit Rohr-Inlinern genannt. Hierzu ist allerdings anzumerken, dass es auch Vorbehalte aufgrund der z.T. hohen Kosten solcher Maßnahmen und dem heute für sie noch nicht bezifferbaren finanziellem Mehrwert besteht. Letztlich wird davon ausgegangen, dass auch zukünftig die Wirtschaftlichkeit einen hohen Stellwert in der Gesamtbetrachtung haben wird.

1.3.4 Schlussfolgerungen

Autoren: Stefan Hay, Dennis Lottis und Holger Dittmer

Das Asset Management von Fernwärmeleitungen muss sich an die individuellen Betriebsmittel sowie die Betriebsbedingungen des vorliegenden Fernwärmesystems anpassen. Die verschiedenen Rohr- und Verlegesysteme bestehen zum Teil aus verschiedenen Werkstoffen, deren Materialdegradation von unterschiedlichen, z. T. kombinierten Alterungsprozessen beeinflusst werden. Die Bandbreite der Nutzungsdauer der in Deutschland eingesetzten Rohrsysteme kann dabei in einem für das Asset Management unzureichend großen Bereich liegen (vgl. Abbildung 6). Für eine Reduktion der damit verbundenen Unsicherheiten zur Nutzungsdauer eines Rohrsystems sind zuverlässige Bestands-, Betriebes- und Schadensdaten erforderlich, die von Fernwärmeversorgungsunternehmen zum Teil mit hohem Aufwand aus vorhandenen Dokumentationsunterlagen zusammengetragen werden müssen. Die Methodik der AGFW Bestands- und Schadensdatenbank bietet Fernwärmenetzbetreibern eine gute Grundlage zum Aufbau bzw. zur Verbesserung bestehender Ansätze zum Asset Management.

Das durchschnittliche Netzalter von 21,6 Jahren der 14 Versorgungsunternehmen die im Rahmen zweier Forschungsprojekte an Befragungen teilgenommen haben, weist darauf hin, dass Fernwärmeleitungen im Durchschnitt die Mindestnutzungsdauer von dreißig Jahren gemäß der Auslegung noch nicht erreicht haben. In Verbindung mit dem Ausbau von Wärmenetzen zur Umsetzung der Klimaziele und dem zunehmenden durchschnittlichen Betriebsalter der Rohrleitungen in Wärmenetzen, steigt die Notwendigkeit für zuverlässige Nutzungsdauerprognosen und gezielte Instandhaltungsstrategien. Neben den im Forschungsvorhaben „SAM-FW“ vorgesehenen Untersuchungen zur Verbesserung von materialbasierten Alterungsmodellen, sind auch Maßnahmen zur Steigerung der Datengrundlage durch bspw. die Umsetzungen zusätzlicher Messpunkte im Wärmenetzen und die Entwicklung von Algorithmen zur Auswertung der anfallenden Daten erforderlich. In Verbindung mit der Einführung von Bewertungskriterien (Key Performance Indicators) sowie der Festlegung zuverlässiger Sollwerte für diese Bewertungskriterien, kann das Asset Management zukünftigen Anforderungen weiter gerecht werden und dazu beitragen, die Resilienz der leitungsgebundenen Wärmversorgung zu erhöhen. Zusätzlich zur Erarbeitung dieser Grundlagen im Forschungsvorhaben „SAM-FW“

sind unterstützende, parallele Maßnahmen der Branche wie der Ausweitung der Bestands- und Schadensstatistik oder der Austausch von Praxiserfahrungen zur Verbesserung bestehender Asset Management Ansätze im Bereich Fernwärmenetze notwendig.

1.4 Zukünftige Betriebsweisen und der Auswirkungen auf das Asset Management

Autoren: Dennis Lottis und Holger Dittmer

Kapitel 1.4 beinhaltet im Kontext des Projekts SAM-FW die Auswirkungen von möglichen zukünftigen Betriebsweisen auf Instandhaltungsstrategien von Rohrleitungen in Wärmenetzen.

Aus der Studie „Fernwärmenetze im Kontext nationaler Klimaziele: Potentiale für "UrbanTurn"“ (Hay et al., 2022b) geht der Status Quo der Fernwärme in Deutschland, die politischen Zielsetzung hinsichtlich des Klimaschutzes, sowie mehrere daraus resultierende in wissenschaftlichen Studien vorgeschlagenen Transformationsmaßnahmen hervor. Diese haben gemein, dass von einer deutlichen Vergrößerung der gesamten Trassenlänge der Wärmenetze in Deutschland ausgegangen wird. Zudem wird die große Bedeutung der Absenkung der Betriebstemperaturen zur Erschließung weiterer Wärmequellen sowie den vermehrten Einsatz von fernauslesbaren Messpunkten herausgearbeitet. Davon ausgehend lässt sich schlussfolgern, dass sich die Betriebsweisen von Wärmenetzen voraussichtlich in Zukunft verändern werden. Durch die Umsetzung von Maßnahmen zur Absenkung des Temperaturniveaus, zur Reduzierung des Energiebedarfes, die Steigerung der Anzahl von Energiebereitstellungsanlagen, die mit erneuerbaren Energien betrieben werden und die Anhebung des Grades an Digitalisierungstechnologien in Fernwärmesystemen könnten Einfluss auf den bestehenden Kraftwerkspark, auf die Infrastruktur selbst und die technischen Gebäudeausrüstung beim Abnehmer haben.

Lund et al. (2014) beschreiben die Entwicklungspfade der Fernwärme anhand von vier Generationen und heben die jeweiligen technischen Eigenschaften hervor. Die erste Generation, die Dampf-Verteilung, war im Zeitraum von 1880 bis 1930 Stand der Technik, weist Fluidtemperaturen von bis zu 200 °C auf, verwendet in situ isolierte Stahlrohre und hat hohe Wärmeverluste. Die zweite Generation, die Heißwasser-Verteilung, war von 1930 bis 1980 die beste verfügbare Technologie. Sie verwendet Fluidtemperaturen über 100 °C und nutzt große und schwere Komponenten, wie beispielsweise Wärmeübertrager. Die dritte Generation, die Warmwasser-Verteilung, wird zeitlich von 1980 bis 2020 eingeordnet und verfügt über Fluidtemperaturen unter 100 °C, vorisolierter Rohre, die direkt erdverlegt, werden und kompakte Übergabestationen. Schließlich umfasst die vierte Generation, die Niedrigtemperatur-Verteilung, die voraussichtlichen zukünftigen Entwicklungen im Zeitraum von 2020 bis 2050. Dabei wird auf Fluidtemperaturen von 30-70 °C abgezielt und die Verwendung von vorisolierten, teilweise flexiblen Rohrleitungssystemen vorgeschlagen. Durch diese Maßnahmen, sowie einer Maximierung der Nutzung von Niedertemperaturwärmequellen, wird eine weitere Steigerung der Energieeffizienz angestrebt. Die Erzeugungstechnologien dieser Generation beinhalten die Nutzung erneuerbarer Energiequellen wie Solarthermie und Geothermie sowie die Integration von kombinierten Wärme- und Kraftwerken. Zudem sind Fernwärmesysteme dieser Generation als integraler Bestandteile eines zukünftigen „Smart Energy Systems“ vorgesehen.

Bei Vergleich der Temperaturverläufe aus den technischen Anschlussbedingungen in Vattenfall Wärme Berlin AG (2024), Hamburger Energiewerke GmbH (2024), Fernheizwerk Neukölln Aktiengesellschaft (2000) und BTB (2018) und den von Lund et al. (2014) beschriebenen Fluidtemperaturbereichen lassen sich die bestehenden Wärmenetze in der ersten Generation (Dampf-Verteilung) und der zweiten Generation (Heißwasser-Verteilung) zuordnen. Der beschriebene Entwicklungspfad lässt ebenfalls den Rückschluss zu, dass sich eine Veränderung im Kraftwerkspark, Reduzierung des Temperaturniveaus, Verwendung von thermischen Speichern für verschiedene Zeithorizonte und die verstärkte Nutzung von Digitalisierungstechnologien zur Kopplung der Sektoren Anwendung finden könnte. Weiterhin

könnte sich durch die Einbindung von einem großen Anteil an Wärmebereitstellungsanlagen mit erneuerbaren Energien, 2-Weg Hausstation ein dynamischer Prozess im Fernwärmesystem einstellen. Tendenziell könnte die Annahme getroffen werden, dass sich die typischen witterungsgeführten Betriebsweisen hin zu einer Last und Prognose geführten Betriebsweise über alle Sektoren im Versorgungsgebiet erstrecken. In verschiedenen Verbundforschungsvorhaben werden unterschiedliche Aspekte und Wärmebereitstellunganlagen mit veränderten Betriebsweisen untersucht. Zum Beispiel in den Verbundforschungsvorhaben:

- ENable (Langemeyer & Krause, 2023) wird am Beispiel des Konversionsgebiets Lagarde-Campus in Bamberg ein automatisiertes Energiemanagement-System im Zusammenspiel mit klassischen Gebäudeleittechnik und externen Diensten und KI-basierten Vorhersagetechniken demonstriert,
- HybridBot_FW (EnEff:Wärme, 2023) wird die Transformation und Betriebsoptimierung von Wärmenetzen für die Entwicklung hybrider Netzstrukturen zur netzdienlichen Betriebsoptimierung untersucht,
- SmartHeat (Schmidt & Dittmer, 2020) wurden unterschiedliche Potentiale durch die Steigerung des Grads an Digitalisierungstechnologien in unterschiedlichen Prozess eines Fernwärmesystems untersucht. Im Rahmen des Verbundforschungsvorhabens wurden simulative entwickelte Betriebsweisen in Prototypen zur Ansteuerung realer Hausstation überführt. Der Fokus lag dabei auf einer Glättung von möglichen Lastspitzen, die durch typische Betriebsweisen eintreten können.

Die Einbindung von Wärmepumpensystemen und Nutzung z.B. von Windstromüberschuss könnten zu einer Betriebsweise führen, bei der z.B. eine Beladung von Speichern in Abhängigkeit des zur Verfügung stehenden Stroms in Verbindung mit Lastprognosen zur Entladung des Speichers nutzbar werden könnten. Ein möglicher Einfluss auf die veränderte Betriebsweise könnte sich aus dem Verbundforschungsvorhaben LAGE-EE (Dittmer et al., 2019) ableiten lassen. Der Fokus lag dabei auf der Entwicklung von Steuerungsalgorithmen für Wärmepumpensysteme, die das Betriebsverhalten der Systeme unter dem Fokus einer Lastverschiebung von Strom aus erneuerbaren Energien anpassen.

Aufgrund dieser Annahmen kann davon ausgegangen werden, dass sich die Betriebsweise des Wärmenetzes durch Veränderungen der Technologien im Kraftwerkspark, in Verteilstrukturen und Übergabesystemen, die Steigerung des Grades an Digitalisierungsmaßnahmen und Technologien und die Reduzierung der kundenseitigen Energiemengen verändern wird. Dabei ist zu erwarten, dass sich durch die genannten Veränderungen eine Reduzierung der Systemtemperaturen einstellen und die Dynamik im Wärmenetz verändern wird. Das kann dazu führen, dass sich eine typische bedarfsorientierte Betriebsweise hin zu einer angebots-, prognose- und bedarfsorientierten Betriebsweise entwickelt. Die Ausprägung der Veränderung der zukünftigen Betriebsweisen wird dabei von den zukünftigen Technologien, der Struktur der Wärmeabnehmer/Wärmebereitsteller, dezentralen Energiebereitstellungsanlagen und der regionalen Verortung des Fernwärmesystems abhängig sein.

Wie in Kapitel 1.3 dargestellt, können die Entwicklungen zukünftiger Betriebsweisen bislang in Asset Management Simulationen nur unzureichend bewertet werden. Dies liegt einerseits daran, dass bspw. die Auswirkung der Absenkung der Betriebstemperatur auf die Nutzungsdauer des Wärmenetzes bislang nur wenig untersucht wurde. Folglich können die aktuell eingesetzten Alterungsmodelle dies nur grundlegend abbilden und müssen durch weitere Forschungsergebnisse verbessert werden. Andererseits müssen in Asset Management Simulations- Tools zukünftig auch Schnittstellen zu bspw. thermo-hydraulischen

Netzsimulationen und weitere Informationen geschaffen werden, damit relevante Kenngrößen bzw. Grundlagen in Instandhaltungs- und Ausbauszenarien bewertet werden können.

Neben der Reduktion der Belastung und der Verlängerung der Nutzungsdauer wirkt sich die Absenkung der Netztemperatur auch positiv auf die Wärmeverluste des Fernwärmenetzes aus.

Bei Hausstationen ist meistens eine Vorlauftemperaturregelung in Abhängigkeit einer gemittelten Außenlufttemperatur vorhanden. Dabei ist zu beachten, dass für die Vorlauftemperatursollwertbestimmung meistens nicht die gemessene Außenlufttemperatur, sondern ein über einen längeren Zeitraum ermittelter Wert genutzt wird.

Bei bestehenden Wärmenetzen könnten auch noch Bestandsanlagen mit einer direkten Einbindung anzutreffen sein. Bei diesen Anlagen könnte die Möglichkeit bestehen, dass keine Vorlauftemperaturregelung vorhanden ist und die Regelung kundenseitig z.B. mittels raumweiser Regelung durch Thermostatventile erfolgt.

Die Fahrweisen des Fluids in einem Wärmenetz berücksichtigen meistens die Anzahl der Abnehmer, geografische Lage, Komplexität des Wärmenetzes, benötigte Systemtemperaturen des Abnehmers, das Nutzerverhalten sowie die Materialeigenschaften des Wärmenetzes.

Der Verbund aus Mantel, Dämmmaterial und Mediumrohr in einem Wärmenetz ist stetig einer großen Temperaturdifferenz zwischen Wärmeträgermedium und der Umgebung ausgesetzt. Neben weiteren Einflussfaktoren (z.B. starke Druckschwankungen, Feuchtigkeit etc.) könnten die z.T. hohen Medientemperaturen Einfluss auf die Materialeigenschaften (z.B. Wärmeleitfähigkeit, Dichte, Scherfestigkeit etc.) aber auch auf die Effizienz im Betrieb nehmen.

Beispielhaft zeigt Abbildung 8 die berechnete Veränderung der spezifischen Wärmeverluste in Abhängigkeit einer veränderten Wärmeleitfähigkeit des Dämmmaterials für verschiedene Wärmedämmserien (Dämmstärken), eines Rohrpaares mit dem Nenndurchmesser DN80. Im weiteren Verbundwerkstoff erfolgte bei dieser Beispielrechnung keine Variation der Wärmeleitfähigkeit. In Abbildung 9 sind analog dazu die berechneten Veränderungen der spezifischen Wärmeverluste in Abhängigkeit der Rohrtemperaturen dargestellt. Es wurden die Randbedingungenaus zugrunde gelegt.

Die Berechnung der spezifischen Rohrwärmeverluste erfolgte dabei gemäß Anhang D der DIN EN 13941 (2022) für zwei erdverlegte Einzelrohre als symmetrische Problemformulierung. Dabei ist:

$$q = (T_s - T_g) * 4 * \pi * \lambda_s * h_s = 2 * \frac{(T_s - T_g)}{R_s} \quad \left[\frac{W}{m}\right]$$

q = Spezifische Rohrwärmeverluste

T_s = Temperatur der Rohre für symmetrische Berechnungen

T_g = Mittlere Erdreichtemperatur

λ_s = Koeffizient der Wärmeleitfähigkeit des Bodens

h_s = symmetrische Wärmeverlustfaktoren

R_s = symmetrischer Dämmwiderstand des Bodens

Tabelle 2: Randbedingungen für die Berechnung der spezifischen Wärmeverluste für drei verschiedene Wärmedämmserien D1, D2, D3 eines Kunststoffmantelrohres mit dem Nenndurchmesser des Mediumrohres DN80 in Anlehnung an DIN EN 13941-1 (2022)

Bezeichnung	Einheit	D1	D2	D3
Abstand von der Oberfläche zur Rohrmitte	m	0,88	0,89	0,9
Abstand zwischen der Mittellinie der beiden Rohrleitungen	mm	360	380	400
Innendurchmesser der Ummantelung	mm	154	174	193.6
Wärmeleitfähigkeit des Bodens	W/mK	1,2	1,2	1,2
Mittlere Erdreichtemperatur	°C	10	10	10
Oberflächenübergangsdämmwert	(m²*K)/W	0,069	0,069	0,069
Mindestwanddicke Ummantelung (EN 253)	mm	3	3	3

In Abbildung 8 (siehe S. 28) sind in blau die prozentuale Veränderung der spezifischen Wärmeverluste über die prozentuale Veränderung der Wärmeleitfähigkeit des Dämmmaterials für die drei Innendurchmesser der Ummantelung aufgetragen. Dabei wird in Anlehnung an die Ergebnisse aus dem IEA DHC|CHP Annex VIII (Ramnäs & Jarfelt, 2008) angenommen, dass die Wärmeleitfähigkeit im Laufe der Zeit z.B. durch das Einwirken von hohen Temperaturdifferenzen auf den Werkstoff von 0,027 W/mK auf 0,0315 W/mK steigt. Weiterhin sind in Abbildung 9 (siehe S. 28) in blau (gestrichelt) die Veränderung der spezifischen Wärmeverluste für eine konstante Wärmeleitfähigkeit des Dämmmaterials für reduzierte Temperaturen des Fluids im Rohr aufgetragen.

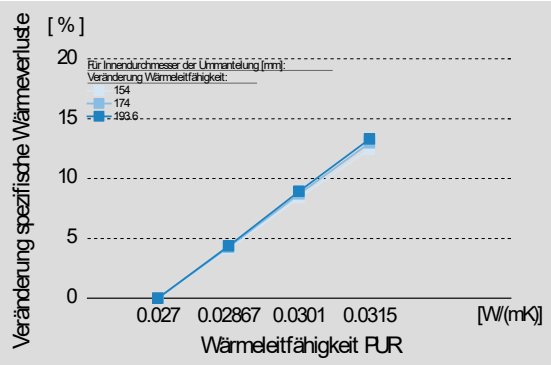


Abbildung 8: Einfluss auf die spezifischen Wärmeverluste durch die Veränderung der Wärmeleitfähigkeit PUR in Anlehnung DIN EN 13941-1 (2022) für variierende Wärmedämmserien (1-3)

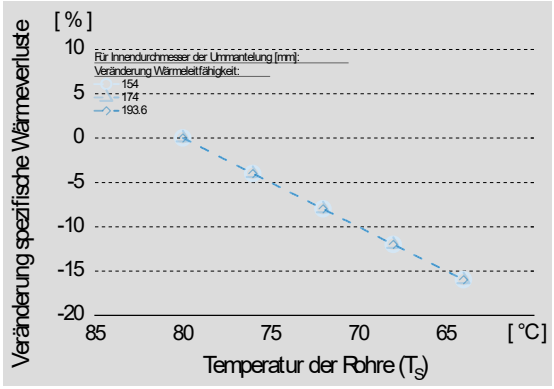


Abbildung 9: Einfluss auf die spezifischen Wärmeverluste durch Temperaturveränderung im Rohr in Anlehnung an DIN EN 13941-1 (2022) für variierende Wärmedämmserien (1-3)

Wie zu erwarten, zeigen Abbildung 8 und Abbildung 9 unterschiedliche Ausprägung auf die spezifischen Wärmeverluste, die stark von dem Einfluss einer veränderten Wärmeleitfähigkeit, den Temperaturen im Rohr und dem Wärmedämmserie (D1-D3) abhängig ist.

Bei bestehenden Wärmnetzen mit Verbundrohrleitung die direkt im Erdreich verlegt sind, werden weitere Parameter für die Berechnung der spezifischen Wärmeverluste in Anlehnung an DIN EN 13941-1 (2022) berücksichtig, z.B. Erdreichtemperatur, Bettungsmaterial, Einbringtiefe/Abstand der Rohrleitung. Diese Parameter sind im Regelfall nicht flächendeckend bekannt und können meistens ohne Öffnung der Trasse nur schwer verändert werden.

Die zukünftigen Betriebsweisen in Wärmenetzen können sich auf Grundlage der Ergebnisse der Dekarbonisierung- und Transformationsmaßnahmen auf Grundlage der lokal verfügbaren Wärmepotenziale (vgl. Bundesförderung Effiziente Wärmenetze (BEW 2022)) ändern. In Verbindung mit der Erschließung der erneuerbaren Wärmequellen und Abwärmepotenzialen ist in vielen Fällen von einer Absenkung der Betriebstemperaturen im Wärmenetz auszugehen. Die Auswirkungen zukünftiger Betriebsweisen können und müssen in Asset Management Simulationen berücksichtigt werden. Neben den positiven Effekten der Temperaturabsenkung auf die Nutzungsdauer der Rohrsysteme im Wärmenetz können sich auch steigende Lastwechselzahlen durch die Einbindung volatiler Wärmequellen und einer Steigerung der Dezentralität der Wärmeerzeugung im Wärmenetz ergeben. Hierzu bedarf es zuverlässiger Asset Simulationen, um mögliche Veränderungen und deren Auswirkungen zu quantifizieren und schonende Fahrweisen unter Berücksichtigung der spezifischen Anforderungen des Fernwärmesystems zu entwickeln.

2. Stand der Technik und der Forschung bei vorausschauenden Instandhaltungsalgorithmen

Autoren: Pakdad Langroudi, Stefan Hay, Dennis Lottis und Holger Dittmer

2.1 Überblick vorausschauende Instandhaltung (Predictive Maintenance)

Autor: Pakdad Langroudi

Fernwärmenetze zielen darauf ab, eine konstante und zuverlässige Wärmeversorgung aufrechtzuerhalten. Die begrenzte Lebensdauer von Systemkomponenten kann jedoch u. U. Ausfallzeiten verursachen, die Reparaturen erfordern.

Die Gesamtheit der Maßnahmen zur Aufrechterhaltung des Betriebes eines Systems wird als Instandhaltung bezeichnet. Im Kontext der Fernwärme können die Folgen unzureichender Instandhaltung über betriebliche Störungen hinausgehen und die Gesamteffizienz sowie die Sicherheit des Systems beeinträchtigen. Aspekte der Versorgungssicherheit sind insbesondere in der Fernwärme entscheidend, da Vernachlässigungen in der Instandhaltung Risiken für das System und die Endnutzer darstellen können.

Instandhaltung in der Fernwärme konzentriert sich nicht nur auf Sicherheit, sie spielt auch eine entscheidende Rolle im Asset Management. Durch die Anwendung effektiver Instandhaltungsstrategien können Betreiber von Fernwärmeanlagen die Leistung des Systems optimieren, betriebliche Kosten minimieren und die Gesamtzuverlässigkeit steigern. Proaktive Instandhaltungspraktiken tragen zur Langlebigkeit und Effizienz der kostenintensiven Infrastruktur bei und gewährleisten eine konstante und sichere Wärmeversorgung für Verbraucher, während sie vor unvorhergesehenen Ausfällen schützen.

Susto et al. (2012) kategorisierten die Instandhaltungsstrategien in vier Hauptgruppen:

1. Run-to-Failure (R2F)
2. Preventive Maintenance (PvM)
3. Condition-based Maintenance (CBM)
4. Predictive Maintenance (PdM)

R2F und PvM sind weit verbreitete Strategien, die ausführlich in (Holmberg, 2010) (Mobley, 2002) (Levitt, 2011) (Yongyi Ran et al., 2019) (Mobley, 2004) (Nachlas, 2017) diskutiert werden. Die jüngsten Fortschritte im digitalen Bereich, einschließlich künstlicher Intelligenz (KI), Internet der Dinge (IoT), künstlicher neuronaler Netze (KNN), Sensor- und Inspektionstechnologien, bieten eine beispiellose Gelegenheit zur Verbesserung bestehender Instandhaltungsaktivitäten, insbesondere auf dem Weg zur Predictive Maintenance. Künftig wird in diesem Dokument der Begriff 'vorausschauende Instandhaltung (VsI)' verwendet (siehe Abschnitt 1.2.3). Infolgedessen haben viele Bereiche/Branchen VsI als ihre neueste Instandhaltungsstrategie übernommen, insbesondere in Bereichen, in denen Zuverlässigkeit oberste Priorität hat, wie z. B. Energieerzeugung, die Öl- und Gasindustrie sowie Versorgungsunternehmen (Selcuk, 2017) (Anupam Sharma, 2019).

Im Fernwärmenetz ist die VsI aus folgenden drei Perspektiven wichtig (Pourbozorgi Langroudi 2022):

1. Umweltaspekte
2. Systemzuverlässigkeit

3. Asset Management.

Umweltaspekte:

VsI spielt eine entscheidende Rolle bei der Schonung der Umwelt. Durch Optimierung der Ressourcennutzung wird der Verbrauch von Materialien, Energie und anderen mit Instandhaltungsaktivitäten verbundenen Ressourcen reduziert. Dies wird erreicht, indem unnötige Reparaturen und Austausche durch die rechtzeitige Identifizierung potenzieller Probleme verhindert werden. Darüber hinaus trägt der Ansatz zur Emissionsreduktion bei, indem sichergestellt wird, dass Maschinen effizient eingesetzt werden und der Bedarf an energieintensiven Notfallreparaturen minimiert wird. Die proaktive Natur der vorhersagenden Instandhaltung hilft auch, Abfälle zu minimieren, da sie die Wahrscheinlichkeit von Ausfällen von Ausrüstung und der daraus resultierenden Entsorgung defekter Komponenten verringert (Pech et al. 2021).

Tabelle 3: Umweltauswirkungen der vorausschauenden Instandhaltung - Einfluss, Erklärung und Berücksichtigung

Umweltaspekt	Erklärung	Berücksichtigungen
Energieeffizienz	Optimierung von Instandhaltungsplänen für reduzierte Ausfallzeiten	Überwachung von Energieverbrauchsmustern und Effizienzverbesserungen
Abfallreduktion	Minimierung von Abfall durch Geräteausfälle	Verfolgung der Reduzierung von Abfall durch ungeplante Instandhaltung
Ressourcenschonung	Verlängerung der Lebensdauer von Geräten	Überwachung des Einflusses auf den Ressourcenverbrauch und Verfolgung der Verlängerung der Lebensdauer
Emissionsreduktion	Verringerung von Kraftstoffverbrauch und Emissionen	Verfolgung der Reduzierung von Emissionen durch optimierte Instandhaltung
Wasserkonservierung	Verhinderung von Lecks und Optimierung von Wassersystemen	Überwachung von Wasserverbrauchsmustern und Reduzierung des Wasserverbrauchs

In diesem Zusammenhang gibt es zahlreiche Studien, die VsI zur Verbesserung der Ressourceneffizienz und Produktionsnachhaltigkeit eingesetzt haben (Demoly & Kiritsis, 2012; Golinska, Fertsch, & Marx-Gómez, 2011; Jasiulewicz-Kaczmarek & Drozyner, 2011; Kumar, Shankar, & Thakur, 2018; Lindström, Larsson, Jonsson, & Lejon, 2017). Einige nutzten VsI zudem zur Reduzierung der Emissionen.

Systemzuverlässigkeit:

Der Kernnutzen der vorhersagenden Instandhaltung in Bezug auf die Systemzuverlässigkeit liegt in ihrer Fähigkeit, Ausfallzeiten zu minimieren. Indem vorhergesagt wird, wann Instandhaltung erforderlich ist, können Organisationen Aktivitäten während geplanter Abschaltungen oder Zeiten mit geringer Nachfrage planen und so einen kontinuierlichen Betrieb sicherstellen. Um die vorausschauende Instandhaltung mit der Systemzuverlässigkeit in der Fernwärme zu verbinden, haben mehrere Studien verschiedene datengestützte Methoden untersucht, um die Systemzuverlässigkeit zu erhöhen (Buffa, Fouladfar, Franchini, Lozano Gabarre, & Andrés Chicote, 2021; Mortensen & Shaker, 2024; Pourbozorgi Langroudi, Weidlich, & Hay, 2021). Der Ansatz trägt auch zur Langlebigkeit der Ausrüstung bei, indem potenzielle Probleme identifiziert und behoben werden, bevor sie zu katastrophalen Ausfällen führen. Diese proaktive Haltung verlängert die Lebensdauer kostenintensiver Infrastruktur, reduziert die Notwendigkeit vorzeitiger Ersatzbeschaffungen und damit verbundener Kapitalausgaben. Letztendlich trägt die vorausschauende Instandhaltung zur Versorgungssicherheit und Versorgungsqualität bei, insbesondere in Fernwärmenetzen, in denen eine kontinuierliche Versorgung von entscheidender Bedeutung ist.

Asset Management:

VsI optimiert das Asset Management, indem sie eine effizientere Planung und Terminierung von Instandhaltungsaktivitäten ermöglicht. Fernwärmenetze können, die von vorhersagenden Instandhaltungssystemen generierten Daten nutzen, um Trends zu analysieren, informationsgestützte Entscheidungen über Asset-Ersatz oder -Upgrades zu treffen und Ressourcen strategisch zuzuweisen. Es wird davon ausgegangen, dass der Ansatz zu erheblichen Kosteneinsparungen im Vergleich zur reaktiven oder geplanten Instandhaltung führen kann. Durch die Behandlung von Problemen, bevor sie sich zu großen Ausfällen entwickeln, könnte VsI, die hohen Kosten für Notfallreparaturen, Ausfallzeiten und Produktionsverluste vermeiden. Solche datengesteuerte Entscheidungsfindung verbessern insgesamt die Asset-Management-Praktiken innerhalb einer Fernwärmenetz (Aremu et al. 2018; Hay et al. 2022a) und werden durch die Untersuchungen im Rahmen des Projektes SAM-FW weiter gestützt werden.

2.2 Rolle der Künstlichen Intelligenz in der Predictive Maintenance

Autor: Pakdad Langroudi

Die technologischen Fortschritte in der Industrie 4.0 haben zu einer Vernetzung der Komponenten eines Systems und zu fortschrittlicher Sensorik geführt. Das Internet der Dinge (IoT) liefert Daten, die auf verschiedene Weise von künstlicher Intelligenz (KI) analysiert werden können (Plattform Industrie 4.0 2024; Bai et al. 2020; Ross and Maynard 2021). Dies war ein entscheidender Wendepunkt in der Instandhaltung, um im Bereich der proaktiven Wartung voranzukommen und diesen neuen Ansatz der vorausschauenden Instandhaltung zu etablieren. Die vorausschauende Instandhaltung revolutioniert das traditionelle Wartungsmanagement in verschiedenen Industrien. Sie basiert auf der Analyse großer Mengen von Betriebs- und Sensordaten, um den Zustand von Maschinen und Systemen in Echtzeit zu überwachen und vorherzusagen, wann Wartungsmaßnahmen erforderlich sind.

Verschiedene KI-Technologien und -Methoden werden eingesetzt, um eine präzisere und effizientere Wartungsplanung zu ermöglichen.

Eine der Hauptaufgaben der KI in der vorausschauenden Instandhaltung ist die Analyse und Interpretation von Sensordaten, die von Maschinen und Systemen gesammelt werden. Maschinelles Lernen (ML) und Deep-Learning-Algorithmen (DL) werden verwendet, um Muster und Anomalien in diesen Daten zu erkennen, die auf potenzielle Ausfälle hinweisen. Durch kontinuierliche Überwachung und Analyse der Daten können diese Algorithmen lernen, welche Parameter und Bedingungen auf einen bevorstehenden Ausfall hinweisen (Mobley 2002).

KI-basierte prädiktive Modelle nutzen historische Daten und Echtzeitdaten, um die verbleibende Lebensdauer von Maschinenkomponenten vorherzusagen. Diese Modelle berücksichtigen eine Vielzahl von Faktoren, wie Betriebsbedingungen, Umweltbedingungen und spezifische Nutzungsmuster. Die präzisen Vorhersagen ermöglichen es, Wartungsmaßnahmen rechtzeitig zu planen und durchzuführen, wodurch ungeplante Ausfallzeiten und hohe Reparaturkosten reduziert werden. Hussain et al. (2023) haben eine systematische Überprüfung durchgeführt, bei der Big Data-Analysen eine wichtige Rolle bei der Verbesserung der Sicherheit, Effizienz und Zuverlässigkeit von Rohrleitungen spielen, und Franki et al. (2023) haben eine umfassende Überprüfung der Energieversorgungsunternehmen durchgeführt, die digitale Lösungen, einschließlich Künstlicher Intelligenz (KI), zur Transformation einsetzen.

Neben der Datenanalyse und Vorhersage unterstützt KI auch die Entscheidungsfindung und die Automatisierung von Wartungsprozessen. Intelligente Systeme können basierend auf den analysierten Daten Empfehlungen für Wartungsmaßnahmen geben und sogar automatische Benachrichtigungen und Aufträge an das Wartungspersonal senden. In einigen Fällen können KI-Systeme auch direkt in die Steuerung von Maschinen integriert werden, um notwendige Anpassungen in Echtzeit vorzunehmen, wodurch die Effizienz und Lebensdauer der Ausrüstung weiter erhöht wird.

Die genannten Ansätze sind im Bereich der Fernwärme noch sehr neu, aber es wurden bereits mehr Studien zu anderen Arten von Rohrleitungen wie Öl und Gas durchgeführt. Ähnlich wie bei der Fernwärme stehen die Öl- und Gasleitungen unter ständigem Druck und Temperatur. (Saboo & Shekhawat (2024) haben drahtlose Sensoren verwendet, um Daten zu übertragen, zentral zu sammeln und darauf aufbauend Modelle zur Erkennung von Gerätefehlern zu trainieren. Diese Forschung wurde im Bereich der Öl- und Gasraffinerie durchgeführt.

Obwohl IoT-gesteuerte fortschrittliche KI-Methoden auf dem Markt stark im Trend liegen, gibt es viele Bedenken hinsichtlich der Cybersicherheit, insbesondere wenn Daten zentral gesammelt und dann analysiert werden müssen. Um dieses Problem zu überwinden, haben Juliet et al. (2024) die Methode des föderierten Lernens zur Leckerkennung in Öl- und Gasleitungen verwendet. Ähnliche Ansätze könnten von der Fernwärmebranche übernommen werden, um Sicherheitsrisiken zu minimieren und nachhaltigere Trainingsmodelle zu schaffen. Obwohl jedes Rohrleitungssystem seine eigenen Einschränkungen und Spezifikationen aufweist, könnten die Ansätze zur Fehlererkennung und Lebensdauerprognose auf das Fernwärmenetz übertragbar sein. Allerdings behindern individuelle Forschungsprogramme und Modellentwicklungen einzelner Netzbetreiber den Wissenstransfer sowie den Austausch von Daten aufgrund unternehmensinterner Richtlinien. Dies erschwert die Fehleranalyse erheblich und verhindert ein umfassendes Verständnis der Ursachen. Um die Situation im Bereich vorausschauenden Instandhaltung zu verbessern, ist daher eine öffentlich geförderte Forschung erforderlich.

2.3 Wissenschaftliche Forschung zu aktuellen Algorithmen

Autor: Pakdad Langroudi

Die Algorithmen und Werkzeuge, die in der prädiktiven Wartung verwendet werden, decken ein breites Spektrum ab. Hier wird versucht, sie systematisch basierend auf den Anwendungen und Ansätzen zusammenzufassen.

a) **Statistische Modelle**

Statistische Modelle spielen eine entscheidende Rolle in der prädiktiven Wartung, indem sie verschiedene analytische Techniken nutzen, um Geräteausfälle vorherzusagen und Wartungspläne zu optimieren, wodurch die Systemzuverlässigkeit erhöht wird. Die Regressionsanalyse nutzt historische Daten, um zukünftige Ausfälle und Wartungsanforderungen vorherzusagen, was umsetzbare Erkenntnisse für präventive Eingriffe liefert. Die Zeitreihenanalyse untersucht zeitliche Muster in den Daten, um zukünftige Ereignisse wie Geräteausfälle vorherzusagen und so die Fähigkeit zu verbessern, Wartungsaktivitäten proaktiv zu planen. Die Überlebenszeitanalyse schätzt die Zeit bis zum Auftreten eines Ausfalls und bietet präzise Zeitpläne für die Wartungsplanung, wie sie in verschiedenen Kontexten der Systemzuverlässigkeit, einschließlich Rohrleitungssystemen, angewendet werden (Walls, 2016; Breton et al., 2010). Gemeinsam verbessern diese statistischen Methoden die prädiktiven Wartungsstrategien, indem sie rechtzeitige und effiziente Wartungsarbeiten gewährleisten, Ausfallzeiten und Betriebskosten reduzieren und die Gesamtzuverlässigkeit des Systems steigern. Durch die genaue Vorhersage des Wartungsbedarfs unterstützen diese Modelle den kontinuierlichen und effizienten Betrieb von Systemen und erhöhen deren Zuverlässigkeit und Lebensdauer erheblich.

b) **Maschinelle Lernmodelle**

Prädiktive Wartung und Ausfallvorhersage in industriellen Systemen, insbesondere in Rohrleitungen, nutzen fortschrittliche Algorithmen des maschinellen Lernens, um potenzielle Ausfälle frühzeitig zu identifizieren und zu verhindern. Durch die Analyse historischer und Echtzeitdaten können diese Algorithmen Muster erkennen, die auf bevorstehende Fehlfunktionen hinweisen, und somit Wartungspläne optimieren und Ausfallzeiten reduzieren. Beispielsweise kann der Random-Forest-Algorithmus eingesetzt werden, um Ausfalltypen zu klassifizieren, indem zahlreiche Entscheidungsbäume analysiert werden, die mit unterschiedlichen Betriebsdaten von Rohrsystemene, wie Druck- und Durchflussraten, trainiert wurden. Ebenso können Support Vector Machines (SVM) genutzt werden, um die Grenze zwischen normalen und abnormalen Betriebszuständen zu definieren, indem die Daten in höhere Dimensionen transformiert werden. Diese Modelle wurden sowohl für Fernwärmenetze als auch für andere leitungsgebundene Infratsurkturen zur Vorhersage von Ausfällen erfolgreich eingesetzt (Beloev et al., 2024; Latifi et al., 2024; Kizilöz, 2024). Neuronale Netze, insbesondere Recurrent Neural Networks (RNNs), eignen sich besonders gut für die Verarbeitung von Zeitreihendaten und ermöglichen so eine kontinuierliche Überwachung und Vorhersage von der Leistungsfähigkeit und Zustand der Rohrleitungen. Diese maschinellen Lernmodelle verbessern, wenn sie in prädiktive Wartungsrahmenwerke integriert werden, die Zuverlässigkeit und Effizienz des Rohrsystems.

c) Deep-Learning-Modelle

Aufbauend auf den Fähigkeiten traditioneller maschineller Lernalgorithmen bieten Deep-Learning-Modelle eine verbesserte Vorhersagegenauigkeit und die Möglichkeit, komplexere Datenstrukturen für die Vorhersage von Rohrleitungsstörungen und Rohrleitungsausfällen zu verarbeiten. Zhou et al. (2024) verwenden ein PCA_BP-Neuronales Netzwerk zur Multifunktionsdiagnose in Fernwärmesystemen. Convolutional Neural Networks (CNNs), die typischerweise in der Bilderkennung verwendet werden, können angepasst werden, um räumliche Muster in Messdaten eines Rohrsystems zu erkennen und subtile Anomalien zu identifizieren, die einem Ausfall vorausgehen könnten (Hossain et al. 2020). Long Short-Term Memory-Netzwerke (LSTMs), eine Art Recurrent Neural Network (RNN), sind besonders effektiv für sequenzielle Daten und eignen sich daher ideal zur Erfassung zeitlicher Abhängigkeiten in der Rohrnetz-Überwachung. Autoencoder, eine weitere Deep-Learning-Architektur, können eine unsupervised[1] Anomalieerkennung durchführen, indem sie lernen, Daten zu komprimieren und zu rekonstruieren und dabei signifikante Abweichungen von normalen Mustern zu markieren. Durch die Integration dieser Deep-Learning-Modelle in prädiktive Wartungssysteme können Organisationen genauere und frühere Ausfallvorhersagen erreichen und somit die Zuverlässigkeit und Betriebseffizienz von leitungsgebundenen Infrastrukturen weiter verbessern.

d) Hybridmodelle

Ergänzend zu traditionellen maschinellen Lern- und Deep-Learning-Ansätzen bieten Hybridmodelle wie ARIMA und physikbasierte plus datengetriebene Modelle ein robustes Rahmenwerk zur Vorhersage von Rohrleitungsausfällen. ARIMA (AutoRegressive Integrated Moving Average)-Modelle, die traditionell in der Zeitreihenvorhersage verwendet werden (Hyndman & Athanasopoulos 2018), können mit maschinellen Lernalgorithmen kombiniert werden, um die Vorhersagegenauigkeit zu erhöhen, indem sowohl lineare Trends als auch komplexe nichtlineare Muster in Messdaten eines Rohrsystems erfasst werden. Darüber hinaus bieten Hybridmodelle, die Simulationen auf Basis physikalischer Gleichungen mit datengetriebenen Techniken integrieren, einen umfassenden Ansatz zur Ausfallvorhersage. Physikalische Modelle, die auf den Prinzipien der Fluiddynamik und Materialwissenschaft basieren, können das physikalische Verhalten von Rohrleitungen unter verschiedenen Bedingungen simulieren. Wenn sie mit datengetriebenen Modellen ergänzt werden, die historische und Echtzeit-Sensordaten nutzen, können diese Hybridansätze Ausfälle genauer vorhersagen, indem sowohl theoretische als auch empirische Erkenntnisse berücksichtigt werden. Diese synergetische Integration von Methoden verbessert die Präzision prädiktiver Wartungsstrategien und sorgt für zuverlässigere und effizientere Betriebsweise von leitungsgebundener Infrastruktur.

e) IoT, Sensor-Datenanalyse und Zustandsüberwachung

Mit der Digitalisierung und Integration von IoT-Geräten in Fernwärmenetze für verschiedene Zwecke, wie beispielsweise zur Vorhersage von Wärmebedarfsprofilen sowie der Fehlererkennung und Ausfallvorhersage, gibt es viele Fortschritte (Schmidt 2023). Die

[1] Das Verfahren „unsupervised Annomalie detection“ kommt aus dem Kontext „Maschine Learning“ und beschreibt darin eine Methode in dem sowohl Eingangs- als auch Zielwerte nicht bekannt sind und der Algorithmus das Muster erkennt. (Quelle: https://medium.com/simform-engineering/anomaly-detection-with-unsupervised-machine-learning-3bcf4c431aff Aufruf 19.03.2025)

Integration von IoT und Sensordatenanalyse mit prädiktiven Wartungs- und Ausfallvorhersagemodellen erhöht die Effektivität der Rohrnetz-Überwachung weiter. IoT-Geräte sammeln kontinuierlich große Mengen an Daten von verschiedenen entlang der Rohrleitungen eingesetzten Sensoren und liefern Echtzeiteinblicke in die Betriebsbedingungen. Fortgeschrittene Analysen verarbeiten diese Daten, um Anomalien zu identifizieren und potenzielle Ausfälle vorherzusagen. Zustandsüberwachungstechniken wie Thermografie verwenden Wärmebildgebung, um Temperaturveränderungen zu erkennen, die auf Probleme wie Leckagen oder schlechte Wärmedämmeigenschaften des Rohrsystems hinweisen. Schwingungsanalyse und akustische Emissionsüberwachung werden ebenfalls eingesetzt, um frühzeitige Anzeichen von mechanischem Verschleiß oder strukturellen Schäden zu identifizieren. Durch die Kombination von IoT-gestützter Datenerfassung mit fortschrittlicher Analyse und Zustandsüberwachungsmethoden können Netzbetreiber eine umfassende und proaktive Wartungsstrategie erreichen, die höchste Zuverlässigkeit und Effizienz für den Betrieb der leitungsgebundenen Infrastruktur gewährleistet.

2.4 Kritik und identifizierte Lücken

Autor: Pakdad Langroudi

Während die aktuelle Literatur eine breite Palette von Modellen und Techniken für die prädiktive Wartung in industriellen Systemen bietet, bestehen nach wie vor erhebliche Lücken, insbesondere im Kontext von Fernwärmenetzen. Im Gegensatz zu anderen Leitungssystemen wie Öl- und Gasleitungen, bei denen Rahmenbedingungen für vorausschauende Instandhaltung weiterentwickelt und weit verbreitet sind, weisen Fernwärmenetze noch Entwicklungsrückstände auf. Eines der Hauptprobleme ist das Fehlen eines gut etablierten, standardisierten Modells für die prädiktive Wartung von Fernwärmeleitungen. Jeder Netzbetreiber neigt dazu, maßgeschneiderte Modelle zu entwickeln oder umzusetzen, die auf seine spezifische Betriebsumgebung zugeschnitten sind, oder arbeitet in vielen Fällen ganz ohne ein prädiktives Modell. Dieser fragmentierte Ansatz behindert nicht nur die Vergleichbarkeit und Generalisierbarkeit von Ergebnissen zwischen verschiedenen Studien, sondern begrenzt auch die Skalierbarkeit und Robustheit von vorausschauende Instandhaltungsstrategien in Fernwärmesystemen.

Die Literatur zeigt auch, dass, obwohl IoT-Geräte und Sensordatenanalysen zunehmend in Fernwärmenetze integriert werden, die Anwendung dieser Technologien zur Ausfallvorhersage noch in den Anfängen steckt. Obwohl es Hinweise auf eine umfangreiche IoT-Einführung in diesen Systemen gibt, ist die Forschung, die sich speziell auf die Ausfallvorhersage konzentriert, noch limitiert und unzureichend. Der Mangel an umfassenden Studien, die sich mit der Integration von IoT-gesteuerten Daten in prädiktive Wartungsmodelle befassen, hebt eine kritische Lücke hervor. Dies ist besonders besorgniserregend, da IoT-Technologien das Potenzial haben, die vorausschauende Instandhaltung durch Echtzeitüberwachung und datengesteuerte Entscheidungsfindung zu revolutionieren.

Darüber hinaus stützen sich die bestehenden Studien zur prädiktiven Wartung von Fernwärmeleitungen oft stark auf Methoden, die für andere Leitungssysteme wie Wasser, Öl und Gas entwickelt wurden. Obwohl diese Methoden einen nützlichen Ausgangspunkt bieten, erfassen sie möglicherweise nicht vollständig die einzigartigen Merkmale und betrieblichen Herausforderungen von Fernwärmenetzen, wie beispielsweise die spezifischen thermischen und hydraulischen Dynamiken. Diese Abhängigkeit von angepassten Modellen kann zu suboptimalen Wartungsstrategien führen, die die spezifischen Anforderungen von Fernwärmesystemen nicht vollständig berücksichtigen, was das Potenzial zur Erreichung optimaler Systemzuverlässigkeit und -effizienz untergräbt.

Eine weitere kritische Lücke ist die begrenzte Erforschung von hybriden Modellen, die sowohl physikbasierte Simulationen als auch datengestützte Techniken im Kontext von Fernwärmenetzen kombinieren. Während solche hybriden Ansätze in anderen Leitungssystemen vielversprechend sind, indem sie die prädiktive Genauigkeit verbessern und ein umfassenderes Verständnis der Ausfallmechanismen bieten, bleibt ihre Anwendung auf Fernwärme unerforscht. Die wenigen existierenden Studien sind oft vorläufig und weisen nicht die Tiefe auf, die erforderlich ist, um robuste, generalisierbare Modelle zu etablieren.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass, obwohl die Integration fortschrittlicher Algorithmen, IoT und Sensordatenanalysen in prädiktive Wartungsstrategien erhebliche Fortschritte gemacht hat, der Fernwärmesektor in dieser Hinsicht sich noch weiterentwickeln muss. Das Fehlen standardisierter Modelle, die begrenzte Forschung zur IoT-basierten Ausfallvorhersage und die unzureichende Anpassung von Methoden an die Besonderheiten von Fernwärmenetzen stellen erhebliche Lücken in der aktuellen Literatur dar. Diese Lücken zu schließen, ist entscheidend, um die Zuverlässigkeit und Effizienz von Fernwärmesystemen zu verbessern und sicherzustellen, dass sie den steigenden Anforderungen auf nachhaltige Weise gerecht werden können.

2.5 Einordnung Fernwärme hinsichtlich des Stands bzgl. vorausschauende Instandhaltung

Autoren: Stefan Hay, Dennis Lottis und Holger Dittmer

Wie bereits in den vorangehenden Kapiteln2.1-2.4 ausführlich beschrieben ist, steht der Einsatz vorausschauender Instandhaltungsstrategien im Bereich Fernwärmenetze erst am Anfang. Maßnahmen wie der Aufbau der AGFW Bestands- und Schadensdatenbank, der Aufbau eines Fernwärmeatlas und GIS-Datenbanken (z.B. Geoportal Hamburg) zielen einerseits darauf ab, die Datenverfügbarkeit zu erhöhen und zu vereinheitlichen, was dazu beiträgt, die Anforderungen hinsichtlich der Datenqualität zur Nutzung von Ansätzen der vorausschauenden Instandhaltungsstrategien zu erfüllen. Anderseits dienen sie der Vermittlung von Methoden und fördern den Austausch zwischen Versorgungsunternehmen, der für die Umsetzung vorausschauender Instandhaltungsstrategien wichtig ist. Trotzdem werden auch zukünftig insbesondere historische Betriebs- und Schadensdaten aufgrund der bisherigen Ansätze nur unzureichend verfügbar sein. Wie groß eine Informations- oder Datenlücke ist, hängt von der bisherigen Erfassung und Dokumentation von (Schadens-)Ereignissen des einzelnen Versorgungsunternehmens ab. Ob und wie gut diese Datenlücken durch beispielsweise Algorithmen zur Bestimmung historischer Betriebsdaten geschlossen werden können, ist zum aktuellen Zeitpunkt noch unbekannt (Langroudi 2018). Wichtig ist, schnellstmöglich eine aus Sicht des Asset Managements ausreichend gute Datenerfassung zu etablieren. Gleichermaßen sollten bei der Datenerfassung auch die Art der Schadenserkennung und die Schadensursache mit aufgenommen werden.

In der Bestands- und Schadensdatenbank des AGFW können Versorgungsunternehmen bei der Dokumentation eines Schadensereignisses zusätzliche Informationen angeben. Bei der Schadenserkennung wird in einem Auswahlmenu in

- Betrieb / Inspektion / visuell
- Korrelation
- Thermographie
- Überwachungssysteme
- Tracestoffe (Helium oder Farbzusätze)
- und andere Verfahren

unterschieden. In Analogie zum Schadenereignis kann auch die Zustandserfassung und -bewertung über entsprechende Arten erfolgen. In einem zweites Auswahlmenu kann die Schadensursache den Kategorien

- Ausführungsfehler
- Materialfehler
- Korrosion
- Verschleiß / Materialermüdung
- Statisches Versagen
- Überbeanspruchung
- und sonstiges

zugeordnet werden. Diese Zuordnung und die damit verbundenen Dokumentation von Schadensereignissen zeigt, dass die weitergehende Beschreibung eines Ereignisses bislang auf die vorhandenen Betriebsdaten und eine entsprechende Korrelation sowie die Erfassung über die Leckage-Überwachungssysteme beschränkt sind.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „SAM-FW“ wurde nachstehende Tabellen erarbeitet. Darin sind verschiedene Informationen und Maßnahmen, die Versorgungsunternehmen bislang nutzen, um den Zustand ihrer Rohrsysteme zu bewerten und die entsprechende Möglichkeit zur Nutzung dessen für vorrausschauende Instandhaltungsstrategien aufgeführt. Die Tabellen beschränken sich dabei auf die den Autoren bekannten Möglichkeiten in Bezug auf das gesamte Wärmenetz und die Netzstruktur (Tabelle 4) und einzelne Rohrsysteme (Tabelle 5-7). Bei den Rohrsystemen wird sich zunächst auf erdverlegte Kunststoffmantelrohre und nicht-begehbare Kanalsysteme konzentriert, da diese nach Einschätzung des Projektkonsortiums im Hinblick auf die Merkmale Anteil, Alter und Bewertungsansätze die größte Relevanz für die meisten Wärmenetze besitzen. Wie die Tabelle (Tabelle 7) aufzeigt, können Frei- und Gebäudeleitungen aufgrund ihrer Zugänglichkeit mit visuellen Verfahren hinsichtlich ihres Zustandes meist sehr gut bewertet werden. Für die Erfassung des Zustandes einzelner Rohrsysteme im Wärmenetz sind, in Abhängigkeit der eingesetzten Methoden zur Zustandserfassung und Bewertung, analoge Dokumentationsformen der entsprechenden Information (wie bspw. Wartungsprotokolle oder Prüfberichte) in der Praxis weit verbreitet. Für die Umsetzung und Nutzung des Ansatzes der vorausschauenden Instandhaltung (VsI) ist es notwendig, dass diese Informationen erfasst, in digitaler Form dokumentiert und gespeichert werden, damit VsI-Tools und entsprechende KI-basierte Algorithmen verwenden können. Darüber hinaus enthalten die jeweilige Spalte „Eignung VsI Stand“ der nachstehenden Tabellen, Einschätzungen und Hinweise der Autoren zur Verfügbarkeit der jeweiligen, für VsI notwendigen Information. Hierbei zeigt sich, dass die Autoren davon ausgehen, dass ein Teil der notwenigen Informationen bereits erfasst werden, jedoch entweder nicht in der erforderlichen Qualität oder bislang noch die Digitalisierung der Information umzusetzen ist.

Tabelle 4: Übersicht zu ausgewählten Informationen zur Zustandserfassung und -bewertung von Fernwärmenetzen sowie deren Eignung für VsI

Ebene	Merkmal / Art	Zustandswert	Zustandsbewertung	Eignung VsI Stand
Wärmenetz (gesamt)	Bestandsdaten	Baujahr	Durchschnittsalter	Ja, vorhanden
	Schadens- & Branchendaten	Statistische Schadensprognose- und Alterungsmodelle	Schadensraten Ausfallwahrscheinlichkeiten Überlebensfunktion	Ja, Datenqualität?
	Hydraulikmodell	Hydraulikmodell	Wichtigkeit / Risiko	Ja, tw. vorhanden
	Betriebsdaten a) Wärmeerzeugungsanlagen b) Wärmenetz inkl. Pumpstationen etc. c) Kundenanlagen	In Abhängigkeit von T_A, Wärmebedarf im Netz (Lastfall) a) T_{VL}, T_{RL}, p, $\dot{V}$, Q b) T_{VL}, T_{RL}, p, $\dot{V}$, Q c) T_{VL}, T_{RL}, p, $\dot{V}$, Q	Gesamtbilanz z. B. $Q_{Verlust}$ Veränderung der Betriebsparameter Ist abhängig vom Grad der Digitalisierung der einzelnen Bereiche (notweniges Maß? / Soll vs. Ist-Zustand)	Ja, vorhanden a) Ja, vorhanden b) Ja, Datenqualität? c) Ja, Datenqualität?
	Betrieb a) Wasserbilanz b) Wasserchemie	a) Wasserverlust b) Wasserqualität	a) Nachspeisemenge b) Leitfähigkeit des Wassers & Risiko für Korrosion (innen)	a) Ja, vorhanden b) Ggf. über Dokumentation
	Visuell a) Thermographie b) Tracerstoffe	a1) Befliegung a2) Befahrung b1) Farbzusätze b2) Helium	a) Thermische Anomalien zum Detektieren von Schäden & Veränderungen b) Detektieren von Leckagen	Ja, wenn vorhanden Info / Referenz / Datenmanagement (DM)

Ebene	Merkmal / Art	Zustandswert	Zustandsbewertung	Eignung Vsl Stand
Netzstruktur	a) Transport / Hauptleitungen b) Verteilleitungen c) Hausanschlussleitungen	a), b) Masche / Trassenabschnitt c) Trassenabschnitt	Hydraulikmodell / Betriebsdaten Topologie	Ja, vorhanden

Tabelle 5: Übersicht zu ausgewählten Informationen zur Zustandserfassung und -bewertung des Rohrsystems Kunststoffmantelrohr sowie deren Eignung für Vsl

Ebene Rohrsystem	Merkmal / Art	Zustandswert	Zustandsbewertung	Eignung Vsl Stand
Kunststoff-mantelrohr (KMR)	Leckageüberwachungs-system	Elektrische Leitfähigkeit / Widerstandsmessung	1) Feuchtigkeit im Rohrsystem 2) Aderabriss 3) Messfehler	Ja, i. d. R. vorhanden, Dauerüberwachung? Dokumentation?
	Verbundsystem inkl. Komponenten	1)Zerstörende Materialprüfung Versuche n. EN 253 2)sowie chem. Analyse des PUR 3)Zellgasanalyse 4)Beschleunigte th. Alterung	1) Ist-Zustand n. EN 253 2) Thermogravimetirsche Analyse, Forier Transformation Infrarot Spektroskopie, PipeOpsy™, Laser Introduced Breakdown Spectroscopie, Raman Spektroskopie 3) Wärmeleitfähigkeit 4) Prognose Restnutzungsdauer	Ja, wenn vorhanden über Dokumentation müssen digitalisiert und an für Vsl geeigneten Orten gespeichert werden
	Stahlmediumrohr	1) Betriebsdaten 2) Akustische Messung 3) Ultraschallunter-suchung	1) Äquivalente Temperaturvolllastwechsel 2), 3) Veränderung der mittleren Wandstärke, Bestimmung der Wandstärke	1)Ja 2), 3) Ja, wenn vorhanden 4), Ggf. über Dokumentation

Ebene Rohrsystem	Merkmal / Art	Zustandswert	Zustandsbewertung	Eignung VsI Stand
		4) Zerstörende Materialprüfungen	4) Schweißnähte, Stahlqualität, Festigkeit, Wandstärke, Magnetitbildung	
	a) PUR-Wärmedämmung	1) Visuell 2) Materialprüfung PUR-Proben 3) Chem. Analyse PUR-Proben	1) Farbgebung des PUR im KMR 2), 3) Vgl. EN 253 oder Schubprüfungen, Thermogravimetirsche Analyse, Forier Transformation Infrarot Spektroskopie, PipeOpsy™, Laser Introduced Breakdown Spectroscopie, Raman Spektroskopie	1)-3), Ggf. über Dokumentation
	PE-Ummantelung	1) Visuell 2) Zerstörende Materialprüfungen	1) Riefen, Riefentiefe 2) Infrarotspektroskopie, Dynamische Differenz-Thermoanalyse (DSC), Schmelze-Massefließrate, Oxidationsinduktionszeit (OIT), Bruchdehnung im Zugversuch	1), 2) Ggf. über Dokumentation

Tabelle 6: Übersicht zu ausgewählten Informationen zur Zustandserfassung und -bewertung des Rohrsystems nicht-begehbare Kanalsysteme sowie deren Eignung für VsI

Ebene Rohrsystem	Merkmal / Art	Zustandswert	Zustandsbewertung	Eignung VsI Stand
	Zustand im Kanalsystem	Messsysteme	Befahrung T, Luftfeuchte, Wassereintrag	Ja, wenn vorhanden
	Stahlmediumrohr	Messtechnik (z. B. Smart Active Box)	Mittlere Wanddicke	

Ebene Rohrsystem	Merkmal / Art	Zustandswert	Zustandsbewertung	Eignung VsI Stand
Nicht-begehbare Kanalsysteme	Elemente zur Dehnungskompensation	Lastwechsel	Anzeige an Kompensatoren	Nein, Auslesung vor Ort, ggf. über Dokumentation
	Wärmedämmung	Befahrung	Visuell	Aktuell nein, wenn Befahrung möglich, ggf. über Dokumentation, ansonsten müssten hier zunächst geeignete Inspektionsgeräte und Modelle zur visuellen Zustandserfassung entwickelt werden, auf Grundlage dieser Innovationen sind VsI Ansätze denkbar Zu 1a),2) Materialprüfungen, Ergebnisberichte müssen digitalisiert und an für VsI geeigneten Orten gespeichert werden
	Ummantelung	Befahrung	Visuell	
	Lagerkonstruktion	Befahrung	Visuell	
	Bausubstanz Kanal	1) Beton: a)Befahrung b)zerstörende Prüfung 2) Stahlbewehrung: Zerstörende Prüfung 3) Abdichtung zwischen den Betonfertigteilen	1) visuell Wanddicke, Risse, Betondruckfestigkeit, Karbonatisierungstiefe, Chloridgehalt im Beton 2) Zugfestigkeit des Stahls, Konstruktion der Bewehrung, Betondeckung der Bewehrung 3) Visuell: Dicht – undicht, Stalaktiten Bildung	

Tabelle 7: Übersicht zu ausgewählten Informationen zur Zustandserfassung und -bewertung der Rohrsystems Frei- und Gebäudeleitungen sowie deren Eignung für VsI

Ebene Rohrsystem	Merkmal / Art	Zustandswert	Zustandsbewertung	Eignung VsI Stand
Freileitungen	Thermische Anomalien	Befliegung mit Drohe, Wärmebildkamera	Visuell	visuell Ja, wenn vorhanden
	Stütz- und Lagerkonstruktionen	Begehung	Visuell	Ggf. über Dokumentation
	Stahlmediumrohr	Begehung	Visuell, zusätzlich ggf. Ultraschall-Messung	Ggf. über Dokumentation
	Wärmedämmung	Begehung	Visuell, zusätzlich ggf. Thermografie-Messung	Ggf. über Dokumentation
	Ummantelung	Begehung	Visuell	Ggf. über Dokumentation
Gebäudeleitungen	Stütz- und Lagerkonstruktionen	Begehung	Begehung Visuell	visuell Ggf. über Dokumentation
	Stahlmediumrohr	Begehung	Visuell, zusätzlich ggf. Ultraschall-Messung	Ggf. über Dokumentation
	Wärmedämmung	Begehung	Visuell, zusätzlich ggf. Thermografie-Messung	Ggf. über Dokumentatio
	Ummantelung	Begehung	Visuell	Ggf. über Dokumentation

Darauf aufbauend zeigt Abbildung 10 aus (Bastidas, Lutz, Dittmer & Kallert, 2022) eine mögliche Methodik zur Überführung von anlogen hin zu digitalisierten Instandhaltungsinformationen. Durch die Steigerung des Grades an digitalisierten Instandhaltungsinformationen in Verbindung mit einem strukturierten Datenmanagement könnten diese Informationen in Prognosemodelle einfließen.

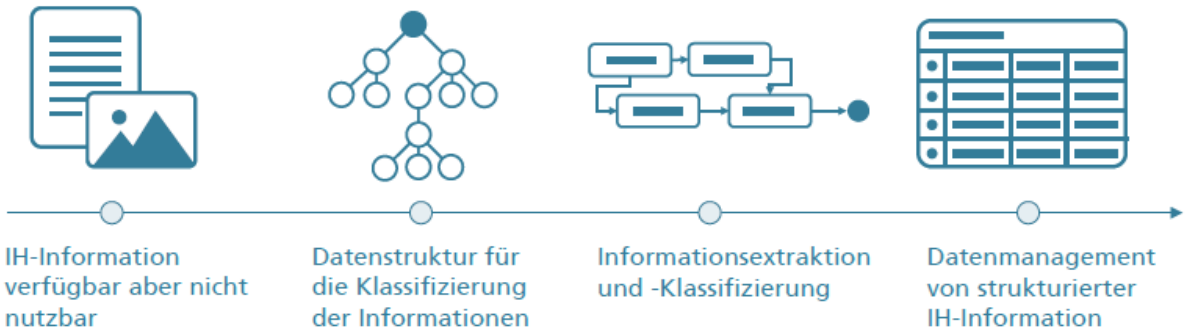


Abbildung 10: Methodik für die Erschließung von verfügbaren, aber nicht direkt nutzbarer Instandhaltungsinformationen (IH-Informationen) (Bastidas, Lutz, Dittmer & Kallert, 2022)

Dabei könnte die Bereitstellung von verschiedenen Informationsquellen und -arten z.B. durch Steigerung von Digitalisierungstechnologien im Fernwärmesystem insbesondere im Wärmenetz, vorhandenen Instandhaltungsprotokollen und weiteren Informationsdaten des betrachteten Assets variieren. Analoge Informationsquellen könnten mittels eines geeigneten Prozesses in eine digitalisierte Struktur überführt und den Modellen zur Ermittlung der Prognosen zum Fortschreiten des Abbaus bereitgestellt werden. Im Rahmen des Projektes Technical Language Processing für Instandhaltungsinformation in Fernwärmesystemen (Bastidas, Lutz, Dittmer & Kallert, 2022), welches vom Hessischen Ministerium für Wissenschaft und Kunst gefördert worden ist, erfolgte die Untersuchung einer Methodik für die automatisierte Annotation von Instandhaltungsinformationen und liefert einen Ansatz für diesen Transformationsprozess.

Für die Verbesserung des Asset Managements von Fernwärmenetzen hin zur Anwendung von vorrausschauenden Instandhaltungsstrategien sind wie in diesem Kapitel beschrieben mehrere Maßnahmen notwendig. Diese reichen von der Datengrundlage bzw. Datenerfassung über die gezielten Erweiterungen von Messpunkten im Fernwärmesysteme, die Digitalisierung von Zustandsbewertungen und deren Dokumentation in einem zentralen Datenmanagement bis hin zur Verbesserung von Alterungsmodellen zur Prognose der Veränderung des Zustands und geeigneten Bewertungen, um kurz vor dem Eintreten eines Schadensereignisse die entsprechende Instandhaltungsmaßnahme durchführen zu können.

3. Lebenszyklus-Bewertung und Kreislaufwirtschaft von Wärmenetzen

Autoren: Stefan Dollhopf, Tillman Deselaers

Zunächst werden die Grundlagen der Ökobilanz angeführt und dann der Kontext auf deren Anwendung im Forschungsprojekt bzw. im Asset-Management hergestellt. Dies ist wichtig, um Begrifflichkeiten und Prozesse der Ökobilanzierung für die weitere Bearbeitung zu definieren.

3.1 Konzept der Ökobilanzierung

Autor: Stefan Dollhopf

Die Lebenszyklus-Betrachtung (engl. Life Cycle Assessment), auch geläufiger als Ökobilanzierung bekannt, ist ein wesentliches Instrument zur Bewertung der ökologischen Qualität im Rahmen der Nachhaltigkeitsbewertung. Sie ermöglicht eine umfassende Beurteilung potenzieller negativer Umweltauswirkungen eines Produktsystems über dessen gesamten Lebenszyklus. Die grundlegenden Konzepte und Methoden der Ökobilanzierung sind in den Normen DIN ISO 14040 (Grundsätze und Rahmenbedingungen) (Deutsches Institut für Normung e.V., 2021a) und DIN ISO 14044 (Anforderungen und Anleitungen) (Deutsches Institut für Normung e.V., 2021b) standardisiert. Diese Normen bieten eine strukturierte Methodik, die auf einem theoretisch-mathematischen Berechnungsansatz basiert, insbesondere im Hinblick auf die Phase der Wirkungsabschätzung.

Die Ziele der Ökobilanzierung können vielfältig sein. In wissenschaftlichen Studien ist es häufig das Ziel, Produktsysteme zu identifizieren, welche nachweislich geringere Umweltwirkungen haben und dadurch Vorzugslösungen aufzuzeigen. Deshalb werden die Studien oft als vergleichende Ökobilanz mit einer Bewertung verschiedener Alternativen entwickelt. Sie können jedoch auch dazu verwendet werden, um Hotspot-Bereiche in den Lebenszyklen von Produktsystemen zu identifizieren, um diese hinsichtlich Ihrer ökologischen Auswirkungen zu optimieren. Das Anwendungsspektrum der Methode reicht daher von Mikro-Studien zur Optimierung von kleinteiligen Herstellungsprozessen bis hin zur Analyse nationaler Strategien, um z.B. energiepolitische Transformationspfade zu bewerten. Auch die Komplexität von Ökobilanzen variiert stark, diese reichen von der Bewertung einzelner Wirkungskategorien bis hin zu umfassenden Analysen zahlreicher Wirkungskategorien, welche komplexe Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen beinhalten (Hauschild et al., 2018).

Die Lebensdauer von Produktsystemen ist ein entscheidender Faktor, insbesondere bei Vergleichen von Produkten mit unterschiedlichen Lebens- bzw. Nutzungsdauern. Um eine Vergleichbarkeit zu ermöglichen, werden die berechneten Umweltwirkungen in der Regel pro Jahr der Lebensdauer berechnet. Die Lebenszyklus-Abschnitte eines Produktsystems variieren je nach spezifischem System, werden jedoch grundsätzlich in die Kategorien Rohstoffgewinnung, Produktion, Nutzung und Entsorgung bzw. Recycling unterteilt. Die Systemgrenzen werden in der Regel fallspezifisch definiert, wobei Ansätze wie „Cradle-to-Gate“ (von der Wiege bis zum Werkstor) oder „Cradle-to-Grave“ (von der Wiege bis zur Bahre) zur Anwendung kommen.

Die Wahl der Methodik und der Untersuchungsrahmen ist von zahlreichen Faktoren abhängig, darunter die Autorschaft, die Zielgruppe, weitere Stakeholder, die Datengrundlage und der Zweck bzw. die Ziele der Bilanzierung. Die Bewertung erfolgt anhand einer funktionellen

Einheit, die auch den quantitativen Nutzen des Produkts abbildet, um eine bessere Vergleichbarkeit von Produktalternativen zu ermöglichen (Frischknecht, 2020).

Der methodische Rahmen der Ökobilanzierung gliedert sich in vier Phasen:

- Ziel und Untersuchungsrahmen (Goal and Scope Analysis)
- Sachbilanz (Life Cycle Inventory)
- Wirkungsabschätzung (Life Cycle Impact Assessment)
- Auswertung (Interpretation)

Ein iteratives Vorgehen ist bei der Entwicklung der Ökobilanzierung erforderlich. Beispielsweise können im Rahmen der Sachbilanz und Wirkungsabschätzung sogenannte Hotspot-Prozesse identifiziert werden, die eine erneute Schärfung und Präzisierung der Datenerhebung erfordern, um die Aussagekraft der Bewertung zu stärken.

Die Quantifizierung der Umweltwirkungen wird in der Phase der Wirkungsabschätzung durchgeführt, hierfür werden für ausgewählte Wirkungskategorien anhand von Indikatoren Werte für die definierte funktionelle Einheit berechnet. Tabelle 8 zeigt beispielhaft mögliche Indikatoren, z.B. das globale Erwärmungspotenzial oder auch Treibhauspotenzial welche in der DIN EN 15978 (Deutsches Institut für Normung e.V., 2021b) bzw. der DIN EN 15804 (Deutsches Institut für Normung e.V., 2022a) als mögliche Indikatoren vorgegeben sind.

Tabelle 8:Auszug von Wirkungskategorien/-indikatoren für die Ökobilanzierung von Gebäuden und Bauwerken

Indikator	Einheit
Globales Erwärmungspotenzial - total (GWP-total)	kg CO2 eq.
Abbaupotenzial der stratosphärischen Ozonschicht (ODP)	kg CFC-11 eq.
Bildungspotenzial für troposphärisches Ozon (POCP)	kg NMVOC eq.
Versauerungspotenzial, kumulierte Überschreitung (AP)	Mol H+ eq.
Eutrophierungspotenzial - Land (EP-terrestrial)	kg N eq.
Potenzial für die Verknappung abiotischer Ressourcen nicht fossile Ressourcen (ADPE)	kg Sb eq.
Potenzial für die Verknappung abiotischer Ressourcen fossile Brennstoffe (ADPF)	MJ

Die Anwendung der Methodik geht in der Regel mit der Nutzung von Datenbanken einher, die ökologische Datensätze mit Informationen zu Emissionen, Wirkungskategorien sowie Energie- und Stoffflüssen bereitstellen. Diese Ökodatenbanken werden häufig von Unternehmen angeboten, die auch Ökobilanzierungs-Software vertreiben. Für die Ökobilanzierung von Gebäuden in Deutschland bietet die „Ökobaudat“ eine kostenfreie Alternative (BBSR, 2019). Für die Ökobilanzierung von Infrastrukturen fehlen noch umfassende Datenbanken.

Durch die strukturierte und standardisierte Methodik der Ökobilanzierung wird eine detaillierte und vergleichbare Bewertung der ökologischen Qualität von Produkten und Prozessen ermöglicht, was einen wesentlichen Beitrag zur Förderung der Nachhaltigkeit in verschiedenen Anwendungen darstellt.

3.2 Anwendung der Ökobilanzierung für Wärmenetze

Autor: Stefan Dollhopf (HCU)

Die Ökobilanzierung von Fernwärme-Infrastrukturen ist ein integraler Bestandteil der Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäuden und Bauwerken. Für die Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden existieren zahlreiche Studien und Zertifizierungssysteme, wie das DGNB-Zertifizierungssystem und das Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BMI, 2019). Innerhalb dieser Systeme werden häufig zumindest Teilaspekte der Ökobilanzierung zur Bewertung der ökologischen Qualität herangezogen.

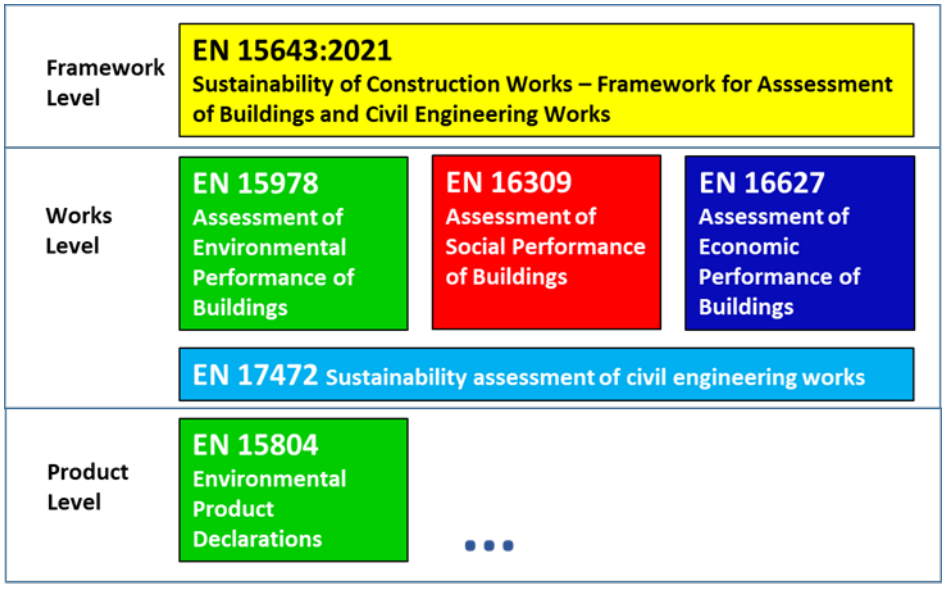


Abbildung 11: Europäische Normstruktur in Anlehnung an vorhandene Abbildungen des CEN/TC 350 (eigene Darstellung)

Die Normstruktur für die Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäuden und Bauwerken, entwickelt durch den Arbeitskreis CEN/TC 350 „Sustainability of construction works“, umfasst die Verwendung der Ökobilanzierung zur Bewertung der ökologischen Qualität. Dieser modulare Aufbau der Normenstruktur ermöglicht eine integrierte Anwendung und besteht aus verschiedenen Phasen des Lebenszyklus eines Bauwerks.

Hersteller von Bauprodukten erstellen ökologische Produktdeklarationen (ÖPD) gemäß den Vorgaben der DIN EN 15804 (Deutsches Institut für Normung e.V., 2022a). Diese Deklarationen werden von Planern und anderen an der Umsetzung beteiligten Personen bei der Bewertung von Gebäuden und Bauwerken nach DIN EN 15978 (Deutsches Institut für Normung e.V., 2021b) genutzt. Im Hochbau existieren bereits Lösungen, die eine automatisierte ökologische Bewertung in den Planungsprozess integrieren, durch Verknüpfung von BIM- und LCA-Methodik, Guignone et al (2023) bieten dazu einen Überblick. Aufgrund der zahlreichen Bewertungs- und Zertifizierungssysteme, der vorhandenen ökologischen Baudaten zu vielen Bauprodukten und den Softwarelösungen zur Umsetzung kann die Bewertung der ökologischen Qualität von Gebäuden als Baupraxis bezeichnet werden. Statistische Auswertungen bilanzierter Gebäude, wie in (DGNB, 2023) dargestellt, liefern bereits Kennzahlen für Indikatoren der Ökobilanzierung, wie das „Treibhauspotenzial pro m² der Nettogrundfläche“. Die zunehmende Implementierung der Ökobilanzierung in der praktischen Ausführung fördert den Umgang mit der Terminologie und das Verständnis der

Bewertungskriterien der Ökobilanzierung und sensibilisiert für deren Ziele, nämlich die Reduzierung negativer Umweltwirkungen.

Im Vergleich dazu stellt die Ökobilanzierung von Fernwärmenetzen ein neues Forschungsfeld dar, für das bislang nur vereinzelte Studien vorliegen. Kürzlich wurde die DIN EN 17472 (Deutsches Institut für Normung e.V., 2022b) für die Nachhaltigkeitsbewertung von Ingenieurbauwerken veröffentlicht, welche als Rahmendokument dient. Diese Norm verweist sowohl auf die Planung als auch auf die Instandhaltung von Bauwerken und gibt Indikatoren und Kriterien für alle Dimensionen der Nachhaltigkeit – ökologisch, ökonomisch und sozial – vor, anhand derer die Bewertung erfolgen kann.

Ein Teil der ökologischen Bewertung besteht aus der Ökobilanzierung, die wie bei Gebäuden die Modularisierung des Lebenszyklus nutzt. Die Terminologie der Norm und deren modulare Gliederung der Lebenszyklusphasen werden für die weitere Analyse verwendet, um die Verständlichkeit zu fördern. Gemäß der Norm ist der Lebenszyklus für die ökologische Bewertung in die Phasen Herstellung, Errichtung, Nutzung und Ende der Nutzung unterteilt.

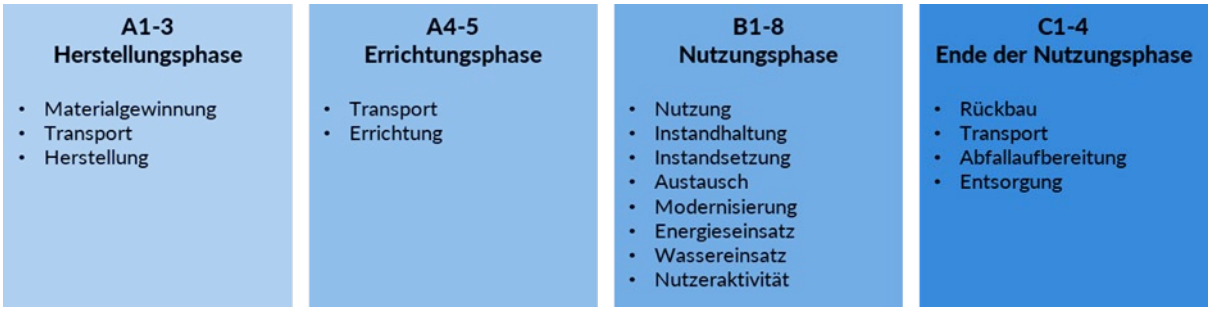


Abbildung 12 Lebenszyklusphasen gem. DIN EN 17472 (eigene Darstellung)

In Abbildung 12 sind die Lebenszyklus-Phasen und deren zugehörige Module dargestellt. Außerhalb der Systemgrenze in Modul D werden Vorteile und Belastungen aus beispielsweise Recycling gelistet. Da der Lebenszyklus gemäß der Norm nach der Entsorgung endet, ist es fallspezifisch zu beurteilen, wie das Recyclingpotenzial einfließt.

Für die weiteren Untersuchungen müssen im Hinblick auf die Anwendung der Ökobilanzierung Systemgrenzen für die Bearbeitungen definiert werden. Die vorliegende Norm wird dabei auf deren Anwendung geprüft und in Teilen angewendet.

3.3 Literaturrecherche zum Stand des Wissens

Autor: Stefan Dollhopf (HCU)

Im Rahmen der Literaturrecherche wurden zahlreiche Studien ausgewertet. Da die Wärmeversorgung und Fernwärmesysteme komplexe Systeme, von der der Wärmeerzeugung, der Wärmeverteilung bis hin zum Betrieb und der Nutzung, darstellen, können viele Teilbereiche in Ökobilanzierungen untersucht werden. Vor allem generell die Art der Wärmeversorgung oder die Wärmeerzeugung bieten sich für vergleichende Ökobilanzierungen an. Beispiele sind hierfür Bartolozzi et al (2017), welche auch einen umfangreichen Überblick zur Ökobilanzierung für Fernwärmesysteme bietet, Ristimäki et al. (2013) oder Famiglietti et al. (2021) sowie Biemann (2015) gehen ebenfalls auf diese Thema

ein. In diesen Untersuchungen werden auch die Wärmenetze als Teile der Fernwärmesysteme bilanziert, jedoch handelt es sich um eher vereinfachte Ansätze, um Wärmenetze als Teil der Infrastruktur Fernwärmesystem. Im Folgenden werden deshalb Studien und deren Ergebnisse eingehender vorgestellt, welche eine detaillierte Bilanzierung von Wärmenetzen enthalten.

Eine schwedische Ökobilanzierung der Fernwärme umfasst drei Studien: Die Rohrherstellung mit verschiedenen Rohrdurchmessern und -systemen (Fröling, Holmgren, Svanström, 2004), den Bau des Wärmenetzes (Fröling, Svanström, 2005) sowie die Nutzungsphase und den Vergleich dieser Lebenszyklusphasen (Persson, Fröling, Svanström, 2006). Die Ergebnisse variieren je nach Rohrgröße, Szenario und Wirkungskategorie, sodass eine detaillierte Unterscheidung notwendig ist. Allgemeine Schlüsse lassen sich jedoch ziehen: Die Nutzungsphase, bewertet anhand der Wärmeverluste und deren Erzeugung über eine 30-jährige Nutzungsdauer, stellt in vielen Wirkungskategorien den Hotspot dar. Je größer die Rohrleitung, desto signifikanter ist die Auswirkung der Rohrherstellung auf die Gesamtbilanz. Bei der Rohrherstellung sind die Produktion der Ausgangsmaterialien (Stahl, PUR und PE) entscheidend. Der Leitungsgraben macht einen wesentlichen Teil des Wärmenetzbaus aus. Doppelrohre können Vorteile gegenüber Einzelrohrsystemen aufweisen, da sie einen geringeren Materialverbrauch, weniger Aufwand beim Bau und geringere Wärmeverluste haben können. Die schwedischen Rahmenbedingungen und Bauweisen unterscheiden sich teils deutlich von den deutschen Verhältnissen, und die Instandhaltung sowie das Ende der Nutzungsdauer wurden nicht bilanziert.

Eine Untersuchung von Oliver-Solà et al. (2009) bilanziert ein Fernwärmesystem in Spanien zur Identifikation von Hotspots. Die Studie umfasst das Wärmenetz mit Fernwärmerohren des Durchmessers DN 100 und verschiedenen Komponenten, die Herstellung der Leitungsgräben, das Kraftwerk sowie die Hausanschlüsse und weitere Komponenten. Ein Szenario wurde entwickelt, um die Wärmeversorgung eines Wohnblocks an einer 100 m langen Straße darzustellen. Der Verteilleitung wurden weitere 4000 m Hausanschlussleitungen zugeordnet. Die Ergebnisse zeigen, dass Fernwärmerohre und die Grabenherstellung, je nach Wirkungskategorie, unterschiedliche Auswirkungen auf die Gesamtbilanz haben. Die Grabenherstellung beeinflusst stark das Treibhauspotenzial des gesamten Systems. Vor allem das Stahlmediumrohr hat einen hohen Anteil an den Umweltwirkungen der Fernwärmerohre.

Eine aktuelle Studie aus Frankreich (Vauchez, Famiglietti, Autelitano et al., 2023) bilanziert den Bau von Fernwärmerohren mit Durchmesser DN 500 und verschiedenen Rohrtypen, darunter starre und flexible Rohrsysteme mit unterschiedlichen Materialien für Mediumrohre, Wärmedämmung und Rohrmantel. Dabei wird der cradle-to-grave Ansatz für eine 50-jährige Nutzungsdauer verwendet. Auch Pumpstationen und Hausübergangsstationen fließen in die Bilanzierung ein. Rohre verursachen den größten Teil der Umweltwirkungen. Besonders bei Rohren mit polymeren Mediumrohren tragen die Leitungsgräben einen hohen Anteil. Die Ergebnisse zeigen deutlich die Einflüsse der Wahl des Rohrsystems und bestätigen die Erkenntnisse von Fröling, Holmgren und Svanström (2004), dass die Herstellung der Ausgangsmaterialien den größten Einfluss hat. Auch Asphaltarbeiten bei den Baumaßnahmen werden als großer Verursacher von Umweltwirkungen identifiziert. Die Studie umfasst zudem die Instandhaltung und Szenarien für das Ende der Nutzungsdauer. Wärmeverluste werden nicht bilanziert, sodass die Auswirkungen von verschiedenen Wärmedämmstoffen auf das Produkt beschränkt sind, ohne deren Funktion zu berücksichtigen.

3.4 Identifizierte Herausforderungen und Chancen

Autor: Stefan Dollhopf (HCU)

Zur Identifizierung der Herausforderungen und Chancen der Ökobilanzierung im Asset-Management von Fernwärmenetzen wurde eine vereinfachte „Goal and Scope“ Analyse durchgeführt und dabei die potenzielle Anwendung hinsichtlich der zuvor beschriebenen Merkmale und Prozesse der Ökobilanzierung geprüft. Die Schwerpunkte der Analyse lagen auf dem aktuellen Wissensstand zur ökologischen Bewertung von Wärmenetzen, den Projektanforderungen, möglichen Datenquellen und der konkreten Anwendung, wie in der folgenden Abbildung 13 dargestellt.

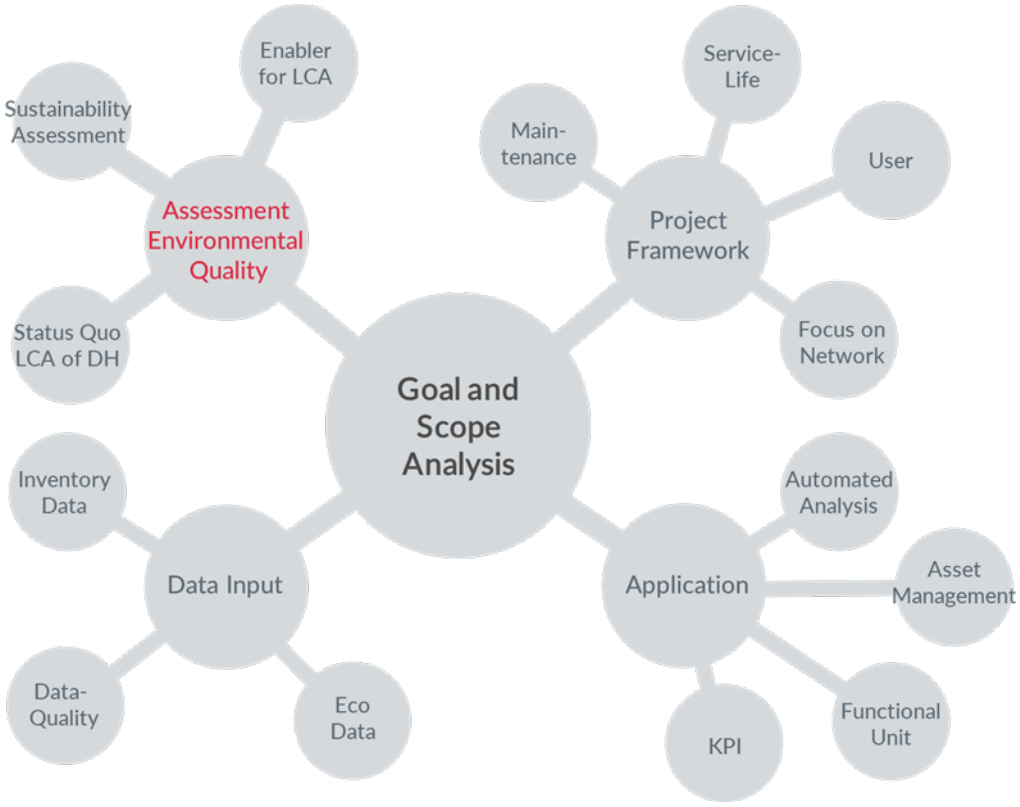


Abbildung 13: Goal and Scope Analyse für die Ökobilanzierung im Rahmen des Forschungsprojekts SAM-FW

Die Recherche zur Anwendung der Ökobilanzierung in der Fernwärme zeigt, dass Normen strukturierte und standardisierte Methodiken für die vergleichbare Bewertung der ökologischen Qualität von Fernwärme-Infrastrukturen sowie einheitliche Begriffe bieten.

Im Gegensatz zu Gebäuden wird die Ökobilanzierung bei Infrastrukturen nicht regelmäßig angewandt. Dies liegt potenziell an fehlenden ökologischen Baudaten, einfachen Softwarelösungen und mangelnden Anreizen aus Zertifizierungssystemen. Es ist deshalb anzunehmen, dass die Nutzer einer potenziellen Lösung für die Ökobilanzierung im Asset-Management wenig Erfahrung mit der Ökobilanzierung und ihrer Wirkungsabschätzung haben. Durch eine integrierte Anwendung innerhalb einer EDV-Lösung für das Asset-Management besteht jedoch die Chance, die Anwendung der Ökobilanzierung im Infrastrukturbau voranzutreiben.

Die Auswertung bestehender Bilanzierungen (vgl. Abschnitt 3.3) zeigt auf, dass die aktuelle Studienlage keine umfassende Grundlage für einen vergleichenden Bewertungsmaßstab,

analog zu Zertifizierungssystemen bei Gebäuden, bietet. Die bisherigen Ökobilanzierungen von Wärmenetzen basieren auf unterschiedlichen geografischen Rahmenbedingungen, was bedeutet, dass insbesondere lokale Bauweisen, Transportdistanzen und nationale Besonderheiten berücksichtigt sind. Zudem variieren die Ansätze hinsichtlich der Systemgrenzen, der Wirkungsabschätzung und der Auswertung. Dennoch bieten die Ergebnisse der Studien die Möglichkeit zukünftige Forschungsergebnisse punktuell zu validieren. Besonders relevant ist, dass die Bilanzierung der Ausgangsprodukte zur Rohrherstellung einen wesentlichen Teil der Umweltwirkungen abdeckt. Allgemeine ökologische Datensätze zu den Ausgangsprodukten können bereits eine hohe Aussagekraft darstellen. Die Studien zeigen auch, dass Instandhaltungstätigkeiten und das Ende der Nutzungsdauer entweder nicht berücksichtigt wurden oder die Annahmen zur Lebensdauer stark vereinfacht sind.

Die Recherche zu ökologischen Baudaten für den Fernwärmeleitungsbau zeigt, dass bisher keine ökologischen Produktdeklarationen (ÖPD) gemäß DIN EN 15804 von Fernwärmerohren vorliegen. Da die Herstellung der Ausgangsprodukte einen wesentlichen Teil der Umweltbelastung verursacht, besteht gutes Potenzial für Rohrhersteller, eine Vorreiterrolle einzunehmen, indem sie ökologische Produktdeklarationen erstellen und nachhaltige Lieferketten etablieren, um negative Umweltwirkungen zu reduzieren. Weiter machen Tiefbauarbeiten einen großen Teil der Bauarbeiten des Wärmenetzbaus aus, hier werden keine Bauprodukte wie im Hochbau verwendet, zu denen meist ÖPDs vorliegen. Die Ökobilanzierung von Infrastrukturen sollte deshalb als Sonderfall betrachtet werden, bei der die spezifischen Charakteristiken von Baustellen, wie z.B. Transportwege zu Gewinnungsbetrieben mineralischer Baustoffe oder Deponien und der Einsatz von Baumaschinen berücksichtigt werden müssen.

Der Bau von Fernwärmeleitungen ist komplex und deshalb herausfordernd im Hinblick auf mögliche Pauschalisierung bei der Anwendung von Algorithmen, dennoch eignet sich der lineare Charakter des Leitungsbaus gut für die Implementierung von Algorithmen für die Ökobilanzierung.

Hinsichtlich der praktischen Anwendung wird im Rahmen dieses Projekts das Asset-Management von Wärmenetzen weiterentwickelt, indem Algorithmen zur Vorhersage der Lebensdauer von Leitungsabschnitten erarbeitet werden. Die Ökobilanzierung wird dabei integriert, jedoch im Konsens mit dem Konsortium ohne Berücksichtigung der Wärmeerzeugung. Üblicherweise wird die Ökobilanzierung als Teil der Planungs- oder für konkrete Instandhaltungs-Maßnahmen durchgeführt. Die Anwendung im Asset-Management, die Automatisierung und mögliche Pauschalisierungen durch Algorithmen stellen Herausforderungen dar, da sie potenziell zu Unschärfen führen können. Für bestehende Infrastrukturen, ist anzunehmen, dass keine Informationen über die ursprünglichen Bauverhältnisse hinsichtlich der Stoff- und Energieströme sowie der Bauweisen vorliegen. Dennoch bietet eine optimierte Lebensdauervorhersage ein erhebliches Potenzial, die Genauigkeit und Aussagekraft von Ökobilanz-Berechnungen zu verbessern.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Ökobilanzierung im Asset-Management von Fernwärmenetzen bedeutende Chancen zur Verbesserung der ökologischen Bewertung und Nachhaltigkeit dieser Infrastrukturen bietet. Trotz bestehender Herausforderungen, wie fehlenden ökologischen Baudaten und mangelnden Anreizen durch Zertifizierungssysteme, eröffnet die Anwendung der Ökobilanzierung Potenziale z.B. im Hinblick auf die Charakteristik, dass der Fernwärmleitungsbau ein lineares Bauwerk mit normierten Querschnitten darstellt. Bestehende Studien (vgl. Abschnitt 3.3) zeigen jedoch, dass die Ökobilanzierung in der Fernwärme noch nicht umfassend etabliert ist. Die Integration einer vereinfachten

Ökobilanzierung in das Asset-Management, insbesondere durch die Lebensdauervorhersage, könnte die Akzeptanz der ökologischen Bewertungen erheblich steigern.

3.5 Aspekte der Kreislaufwirtschaft

Autoren: Stefan Dollhopf (HCU)

Das Konzept der Kreislaufwirtschaft verfolgt den Ansatz, durch einen verantwortungsvollen Umgang mit Gütern und Materialien während und nach deren Lebenszyklus einen Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung leisten. Kirchherr et al. (2017) beschreiben das Konzept der Kreislaufwirtschaft umfassend mit:

"A circular economy describes an economic system that is based on business models which replace the 'end-of-life' concept with reducing, alternatively reusing, recycling and recovering materials in production/distribution and consumption processes, thus operating at the micro level (products, companies, consumers), meso level (eco-industrial parks) and macro level (city, region, nation and beyond), with the aim to accomplish sustainable development, which implies creating environmental quality, economic prosperity and social equity, to the benefit of current and future generations."

Die Definition beinhaltet das sogenannte „4-R Principle" welches für das Reduzieren von Abfällen (Reducing), das Wiederverwenden (Reusing), das Wiederaufbereiten (Recycling) und die Verwertung z.B. energetisch (Recovery) von Abfällen steht. Diese Abfallhierarchie findet sich auch in §6 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG) wieder, welches erst als fünften Schritt die Beseitigung von Abfällen anführt. Der Bausektor gilt in Deutschland als einer der Hauptverursacher von Abfällen (BMUV, 2023) und Verbraucher von Ressourcen, deshalb muss der nachhaltige Umgang mit Bauwerken über deren gesamten Lebenszyklus gefördert werden, um Abfälle zu vermeiden und Stoff-Kreisläufe zu schließen. Im Weiteren wird deshalb auf die Aspekte des Abfallmanagements von Wärmenetzen eingegangen, um Potenziale und Herausforderungen zu identifizieren.

Fernwärmenetzbetreiber stellen hohe Anforderungen an die Versorgungssicherheit ihrer Fernwärmenetze. Um das Risiko eines Schadens zu reduzieren kann es vorkommen, dass Rohre noch vor dem Ende ihrer Nutzungsdauer ersetzt werden, um die Versorgungssicherheit zu gewährleisten. Dadurch wird das Potenzial der Materialien nicht vollständig ausgeschöpft. Die Implementierung von Algorithmen zur Vorhersage von Nutzungsdauern, wie sie im Rahmen des Projekts untersucht wird, trägt deshalb in hohen Maßen der Vermeidung von Abfällen im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgesetz bei und setzt an der obersten Stufe der Abfallhierarchie gemäß dem KrWG an.

Die Hauptbestandteile von Wärmenetzen sind die Rohre, die in der Regel als Verbundrohre ausgeführt sind. Diese bestehen aus einem Transportrohr, das von einer außenliegenden Wärmedämmschicht umgeben ist, wodurch ein Verbundwerkstoff entsteht. Solche Verbundwerkstoffe gelten als problematisch in Bezug auf ihre Wiederaufbereitungs- und Recyclingfähigkeit, da die entsprechenden Prozesse, insbesondere zur Trennung der Materialien, meist mit hohem Arbeits- und/oder Energieaufwand verbunden sind. Das derzeit am häufigsten eingesetzte Rohr ist das Kunststoffmantelrohr, welches aus einem Stahl-Mediumrohr, einer Wärmedämmung aus Polyurethan (PUR) und einem Mantel aus Polyethylen (PE) besteht. Dieses Rohr hat eine Sandwichstruktur, wobei die einzelnen Komponenten kraftschlüssig miteinander verbunden sind. Zusätzlich werden zwei metallische Drähte zur Leckageortung in die Wärmedämmung integriert, und das Einbringen einer dünnen

Aluminium oder EVOH-Diffusionsbarriere unter dem PE-Mantel kann den Gasaustausch über die PE-Ummantelung reduzieren.

Die drei Hauptbestandteile der Kunststoffmantelrohre haben unterschiedliche Potenziale hinsichtlich der Kreislaufwirtschaft. Die Sammelrate von Stahl im Bauwesen beträgt nahezu 100% (Helmus & Randel, 2023). Allerdings kann bezweifelt werden, dass dies auch für unterirdische Infrastrukturen gilt, da Leitungen nach Ende der Nutzungsdauer teilweise im Boden verbleiben (Famiglietti et al., 2021), dies hat sowohl technische als auch ökonomische Gründe. Gesammelte Stahlabfälle haben eine sehr hohe stoffliche Recyclingquote und recycelter Stahl wird in der Regel als Sekundärrohstoff der Stahlerzeugung zugeführt (Helmus & Randel, 2023). Trotz des energieintensiven Recyclingprozesses kann dem Stahl ein hohes Kreislaufwirtschaftspotenzial zugeschrieben werden, da die Stoffe im Kreislauf verbleiben.

Der PUR-Schaum der Schicht für die Wärmedämmung hat aufgrund seiner strukturellen Zusammensetzung hervorragende Wärmedämmeigenschaften, was die Recyclingprozesse jedoch sehr komplex und energieaufwändig macht und oft unrentabel ist (Post et al., 2020). Daher ist das Kreislaufwirtschaftspotenzial von PUR eher gering einzuschätzen, denn es kommen ausschließlich Primärressourcen zum Einsatz, welche am Ende der Nutzungsdauer oft thermisch verwertet werden. Untersuchungen, wie von Doyle (2022), zielen deshalb darauf ab, neue Materialien für die Wärmedämmung zu finden, um die Rohre kreislaufwirtschaftsgerechter zu gestalten.

PE ist ein Werkstoff, der sich grundsätzlich für das stoffliche Recycling eignet, jedoch wirken sich die Recyclingprozesse oft negativ auf die stoffliche Reinheit aus (KRV, 2023). Des Weiteren bestehen hohe Anforderungen an die Qualität der Werkstoffe für die Rohrherstellung. Deshalb werden fast ausschließlich Primärrohstoffe eingesetzt, hier besteht Potenzial für eine Optimierung im Hinblick auf die Kreislauffähigkeit.

Auch bei den Erdarbeiten des Fernwärmeleitungsbau kommen fast ausschließlich Primärrohstoffe zur Anwendung. Dies hat vielfältige Hintergründe. Durch die wechselnden wärmeinduzierten Dehnungen von Fernwärmeleitungen treten hohe mechanische Beanspruchungen beim Betrieb auf. Die Rohr-Boden Interaktion ist deshalb ein wichtiger Teil der statischen Berechnung und die Anforderungen der Normen geben vor, für die Bettung von Kunststoffmantelrohren ausschließlich Natursande mit einer bestimmten Korngrößenverteilung einzusetzen(EN 13941-1, 2022; AGFW FW 401, 2021). Des Weiteren werden die Baustellen meist unter urbane Randbedingungen abgewickelt, bei denen es an Zwischenlagerflächen mangelt. Dies bedeutet, dass ausgehobenes Material oft auf Deponieflächen gebracht wird und zusätzlich auf primäre Rohstoffe bei der Verfüllung des Leitungsgrabens zurückgegriffen wird. Zukünftige Entwicklungen lassen jedoch darauf schließen, dass zukünftig auch vermehrt Recyclingbaustoffe eingesetzt werden könnten, hierfür müssen jedoch normative Grundlagen im Hinblick auf die Kreislaufwirtschaft angepasst werden (Weidlich & Grajcar, 2017).

Es lässt sich feststellen, dass die Implementierung einer Kreislaufwirtschaft im Bereich der Fernwärmenetze bedeutende Herausforderungen, aber auch erhebliche Potenziale bietet. Ein entscheidender Aspekt ist dabei die Verlängerung der Nutzungsdauer und die Instandhaltung der Netze, die nicht nur Abfälle reduziert, sondern auch den Ressourcenverbrauch minimiert. Dies ist vor allem vor dem Hintergrund der Problematik durch Verbundwerkstoffe und nicht kreislaufgerechte Materialien wie PUR-Schaum zu unterstreichen. Im Leitungsbau besteht jedoch noch Potenzial durch innovative Ansätze und eine Anpassung der normativen Grundlagen für eine Optimierung im Hinblick auf die Kreislaufwirtschaft, um die Nachhaltigkeit von Fernwärmenetzen zu steigern und damit einen wichtigen Beitrag zur Kreislaufwirtschaft und zum Klimaschutz zu leisten.

3.6 Entwicklungen in der Branche

Autor: Tillmann Deselaers

Wie in vielen Bereichen der Gesellschaft ist auch in der Fernwärme ein steigendes Bewusstsein für Nachhaltigkeit bemerkbar, welches sich in den Unternehmenskulturen widerspiegelt. Ein bewussterer Umgang mit Ressourcen führt zudem zu einer Reduktion von Abfall.

Die Ansätze der Branche zur Kreislaufwirtschaft hängen von der jeweiligen Rolle ab, die sie am Markt einnehmen. So ist auch der Fokus an welchem Punkt der Kreislaufwirtschaft optimiert wird, je nach Anforderungen und Möglichkeiten verschieden.
Versorger und Netzbetreiber garantieren Versorgungssicherheit sowie Netzstabilität und haben daher ihr Augenmerk auf der Instandhaltung des Bestandes. Ein Beitrag zur Kreislaufwirtschaft wird im folgenden Beispiel deutlich und brachte nicht nur ökologische, sondern auch ökonomische Vorteile für den Betreiber.

Die verwendete Strategie des Betreibers der Instandhaltung ist eine präventive Instandhaltung, welche durch eine gut dokumentierte Überwachung des Netzes möglich ist. In einem Konkreten Beispiel sollte ein 500 m langes nicht-begehbares Kanalsystem erneuert oder saniert werden. Bei der Sanierung des Kanals konnten die Rohrleitungen inkl. Lager und Wärmedämmung erhalten bleiben und nur das Bauwerk wurde saniert. So konnte die Produktion der Stahlrohre, inklusive des Provisoriums im Fall eines Neubaus, eingespart werden. Die CO_2 Einsparung liegen in diesem Fall bei 160.866 kg CO_2 e. Die Hochrechnung des Beispiels auf das gesamte Netz des Betreibers führte zu einer finanziellen Entlastung von 66 Mio. € (Magnus Ohlsson, 2024).

Die Wiederverwertbarkeit der Werkstoffe und Verwendung von recycelten Materialien sind Ansätze, die auch von den Herstellern von Rohrsystemen verfolgt werden. Konkret sind die Zielsetzungen:

- Die Produkte so zu gestalten, dass die Komponenten möglichst wiederbenutzbar sind bzw. recycelt werden können
- Nutzung erneuerbarer Energien
- Verwendung recycelter Materialien in der Herstellung der Produkte
- Reduzierung von CO_2 durch Carbon Dioxide Removal Technologien (CDR)

Die Umsetzung der Ziele erfolgen durch Umweltmanagementsysteme nach ISO 14001 (Bsp. Brugg AG, 2023).
So hat Kingspan-Logstor ein Rohrsystem mit einem Mantelrohr aus recyceltem PE-HD Kunststoffmantelrohre hergestellt, die die Anforderungen nach EN 253 (2022) erfüllen. Darüber wird neben der Einsparung von Ressourcen auch der Ausstoß von CO_2 reduziert (LOGSTOR, 2024).

Eine Entwicklung, die schon in anderen Bereichen der Baubranche existiert, sind Life Cycle Assessment (LCA) für Bauteile und, oder Komponenten des Rohrsystems. So wurden von Kingspan-Logstor und Isoplus Suomi OY „Environmental Product Declarations“ (EPD) für Einzel und Doppel KMR veröffentlicht (EPD Hub, 2025; Isoplus, 2024). Mit dem „cradle to grave“ Ansatz werden die Produkte über ihre gesamte Lebenszeit betrachtet. Ausgenommen in den Analysen ist die Nutzungsphase (B), da hier keine Veränderungen der Umwelt angenommen werden. Des Weiteren wird im EPD von Logstor der Transport zur Baustelle nicht berücksichtigt (EPD Hub, 2025). Der Hersteller Poliurs hat bereits seit 2022 ein EPD, allerdings wird hierbei nur der „cradle to gate“ Ansatz verwendet, sodass weder der Einbau noch die Entsorgung in die Bilanz einfließen (Poliurs, 2022).

Auch der Umgang mit Baustoffen steht in der Debatte als Beitrag zu der Kreiswirtschaft. Den gerade der Mangel an Baustoffen, wie Sand, macht deutlich welchen wirtschaftlichen Vorteil, das Recyclen von Baustoffen haben kann. Auch die Wiederverwendung des Aushubs, sofern es Freiflächen im urbanen Raum gibt, reduzieren erheblich den Einsatz von Baustoffen sowie die Emissionen aufgrund von An- und Abtransport.

4. Kriterienkatalog für die Algorithmusentwicklung

Autoren: Pakdad Langroudi, Stefan Dollhopf (HCU) und Maria Schwarze (3S Consult)

4.1 Definition und Bedeutung der Kriterien

Autoren: Pakdad Langroudi, Stefan Dollhopf (HCU) und Maria Schwarze (3S Consult) ….

Die Entwicklung von Algorithmen, die den Nachhaltigkeitsgrad der Netze bewerten, ist entscheidend für eine effiziente und numerische Bewertung eines Fernwärmesystems in ökologischen, sozialen und wirtschaftlichen Dimensionen. Die drei Säulen - Ökologie, Ökonomie und Soziales – bilden die Grundlage des Nachhaltigkeitsdreieckes (Ahern 2011; Coaffee 2008; Newman & Kenworthy 1999):

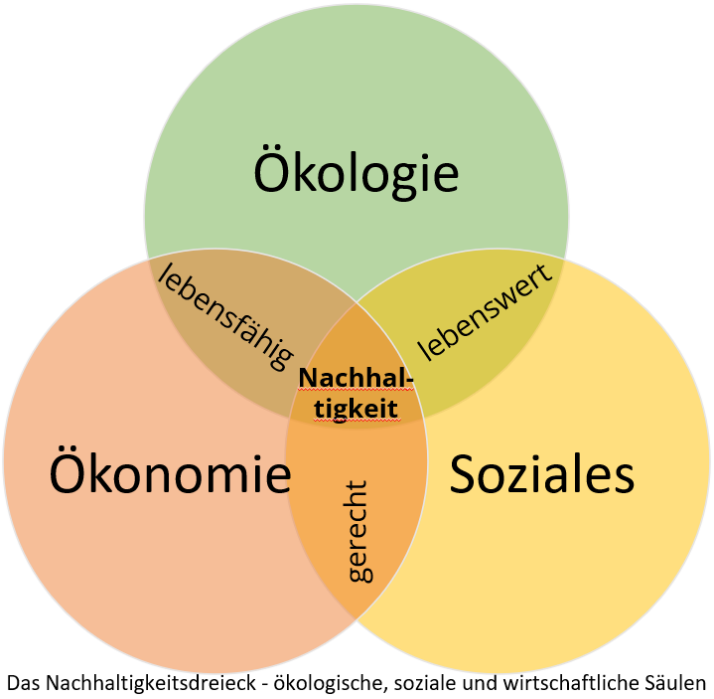


Abbildung 14: Das Nachhaltigkeitsdreieck

Es stellt die Grundlage für die nachfolgenden Nachhaltigkeitskriterien dar (Pavlovskaia 2014). Die in diesem Abschnitt beschriebenen Kriterien sollen die Entwicklung der Algorithmen leiten und sicherstellen, dass sie sich an den Kernprinzipien der Nachhaltigkeit, speziell für Fernwärme, orientieren. Um diesen Prozess einzuleiten, wurde ein Satz von 18 Kriterien vorgeschlagen. Jedes Kriterium wurde sorgfältig definiert, um seine Bedeutung im Bereich der Fernwärmenetze zu erfassen und die spezifischen Herausforderungen und Chancen dieser Systeme anzugehen. Diese Kriterien könnten die Grundlage für Algorithmen bilden, die systematisch die Nachhaltigkeit eines Netzes bewerten und so Einblicke in seine Gesamtleistung geben sowie Verbesserungsmöglichkeiten aufzeigen.

1. **Energieeffizienz**
   Energieeffizienz ist ein entscheidender Faktor bei der Bewertung der Nachhaltigkeit von Fernwärmenetzen. Dieses Kriterium bewertet, wie effektiv das Netz Energiequellen nutzt, wobei Faktoren wie Wärmeverluste, Energieumwandlungseffizienz und der gesamte Energieverbrauch des Systems berücksichtigt werden (Latosov et al. 2019). Algorithmen, die die Energieeffizienz bewerten, stufen das Netz nach seiner Fähigkeit ein, Energieverschwendung zu minimieren und den Ressourceneinsatz zu optimieren, was zu geringeren CO_2-

Emissionen und reduzierten Betriebskosten beiträgt (Hast et al. 2018). Die Messung des gesamten Energieverlusts im Netz als Prozentsatz der insgesamt gelieferten Energie wäre eine einfache Methode zur Bewertung der Effizienz eines Netzes.

2. **Umweltbelastung**
   Die Umweltbelastung in Fernwärmenetzen bezieht sich auf die potenziellen negativen Auswirkungen des Systems auf die umliegende Umwelt. Dazu gehören Emissionen aus der Wärmeerzeugung, der Emissionen der Energiequellen und die Auswirkungen auf lokale Ökosysteme. Algorithmen, die auf Umweltbelastung fokussiert sind, vergeben eine Nachhaltigkeitsbewertung basierend auf der Fähigkeit des Netzes, schädliche Emissionen zu reduzieren, sauberere Energiequellen zu nutzen und seinen ökologischen Fußabdruck zu minimieren (Hast et al. 2018). Die gesamten Treibhausgasemissionen (THG) (CO_2-Äquivalent) pro gelieferter Energieeinheit (z. B. kg CO_2e/MWh) sollten quantifiziert werden. Dies kann mit etablierten Benchmarks oder gesetzlichen Grenzwerten verglichen werden, um die Umweltbelastung zu bewerten (Chinese et al. 2024).
3. **Ressourceneinsatz**
   Der Ressourceneinsatz bewertet, wie nachhaltig das Fernwärmenetz Materialien und Energiequellen nutzt. Dieses Kriterium betont die Bedeutung eines effizienten Ressourcenmanagements, einschließlich des nachhaltigen Einsatzes von Wasser, Brennstoffen und Baumaterialien (Averfalk et al. 2021). Algorithmen, die dieses Kriterium bewerten, vergeben Noten basierend auf der Fähigkeit des Netzes, den Ressourcenverbrauch zu minimieren, Recycling zu fördern und Abfall zu reduzieren, wodurch die Gesamtnachhaltigkeit des Systems verbessert wird. Eine Untersuchung zur Berechnung des Anteils erneuerbarer/recycelter Ressourcen, die in einem Netz verwendet werden, könnte zur Bewertung dieses Kriteriums herangezogen werden (Jentsch 2025).
4. **Lebenszyklusanalyse**
   Die Lebenszyklusanalyse (LCA) bietet eine ganzheitliche Bewertung der Umweltauswirkungen, die mit Fernwärmenetzen über ihren gesamten Lebenszyklus hinweg verbunden sind – von der Planung und dem Bau über den Betrieb bis hin zur Stilllegung. Algorithmen, die die LCA einbeziehen, vergeben Nachhaltigkeitsbewertungen basierend auf den gesamten Umweltauswirkungen des Netzes über dessen Lebensdauer, wodurch Stakeholder die langfristigen Nachhaltigkeitsimplikationen ihrer Systeme besser verstehen können (siehe Kapitel 3).
5. **Integration erneuerbarer Energien**
   Die Integration erneuerbarer Energien in Fernwärmenetze ist entscheidend für das Erreichen von Nachhaltigkeitszielen. Dieses Kriterium bewertet, in welchem Ausmaß erneuerbare Energiequellen wie Biomasse, Geothermie, Solarthermie und Abwärme im System genutzt werden (Herpich et al. 2024; Fuchs et al. 2025). Algorithmen, die dieses Kriterium bewerten, stufen das Netz nach seinem Anteil an erneuerbaren Energien ein, was den Beitrag des Netzes zur Reduzierung der Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen und zur Senkung der Treibhausgasemissionen widerspiegelt. Die Quantifizierung des Anteils der aus erneuerbaren Quellen erzeugten Energie als Prozentsatz der insgesamt erzeugten Energie könnte zur Bewertung herangezogen werden (AGFW FW 309, 2023).
6. **Robustheit und Zuverlässigkeit**
   Die Robustheit und Zuverlässigkeit bewerten die Fähigkeit des Fernwärmenetzes, unter verschiedenen Bedingungen eine gleichbleibende Leistung zu erbringen.

Dieses Kriterium berücksichtigt die Widerstandsfähigkeit des Systems gegenüber Ausfällen und seine Fähigkeit, einen kontinuierlichen Betrieb zu gewährleisten (Mortensen & Shaker 2024; Rafati & Shaker 2024, Meerow et al. 2016). Algorithmen, die dieses Kriterium bewerten, stufen das Netz nach seiner Stabilität und Zuverlässigkeit ein, was für die langfristige Nachhaltigkeit und Kundenzufriedenheit entscheidend ist. Zur Bewertung dieses Kriteriums könnte die Berechnung der Systemausfallzeiten als Prozentsatz der gesamten Betriebsstunden pro Jahr herangezogen werden.

7. **Soziale Auswirkungen**

   Das Kriterium der sozialen Auswirkungen bewertet die Effekte des Fernwärmenetzes auf die lokale Gemeinschaft, einschließlich Aspekte wie öffentliche Gesundheit, Sicherheit und soziale Gerechtigkeit. Dieses Kriterium ist entscheidend, um sicherzustellen, dass die Vorteile des Netzes gerecht verteilt werden und dass negative soziale Auswirkungen gemindert werden (Lagoeiro et al., 2024). Algorithmen, die sich auf soziale Auswirkungen konzentrieren, bewerten das Netzwerk anhand seiner Merkmale, das Wohlbefinden der Gemeinschaft zu verbessern, einen gerechten Zugang zu Dienstleistungen zu gewährleisten und positiv zur sozialen Nachhaltigkeit beizutragen. Eine Methode zur Bewertung dieses Kriteriums könnte die Durchführung von Online-Befragungen sein. Die Umfrage könnte die Bewohner nach ihrer Zufriedenheit mit dem Wärmeversorgungsunternehmen befragen, auf einer Skala von 1 bis 10, und anschließend den durchschnittlichen Zufriedenheitswert berechnen. In ISO 37120, insbesondere in Anhang A (Abschnitt 7), gibt es einen Energieindikator, der hauptsächlich für den Stromverbrauch und Stromausfälle berechnet wird. In ähnlicher Weise könnte dieser Indikator auch für die Lieferung von Fernwärmeenergie genutzt werden. Dies könnte eine Initiative sein, die in ISO 37120 integriert wird. (ISO 37120:2018).

8. **Wirtschaftlichkeit**

   Die wirtschaftliche Effizienz ist ein Schlüsselfaktor bei der Nachhaltigkeitsbewertung von Fernwärmenetzen. Dieses Kriterium bewertet die Kostenwirksamkeit des Netzes, wobei sowohl die anfänglichen Investitionen als auch die langfristigen Betriebskosten berücksichtigt werden (Snoek et al. 2002). Algorithmen zur Bewertung der wirtschaftlichen Effizienz vergeben eine Bewertung basierend auf der Fähigkeit des Netzes, ein gutes Preis-Leistungs-Verhältnis zu bieten, finanzielle Tragfähigkeit zu gewährleisten und sicherzustellen, dass Nachhaltigkeitsmaßnahmen langfristig auch wirtschaftlich nachhaltig sind. Die Bestimmung der Auswirkung des Alters sowie der Nutzungsdauer des Wärmenetzes bzw. einzelner Rohrabschnitte auf die Wärmegestehungskosten könnte ein effektiver Ansatz zur Quantifizierung dieses Kriteriums sein.

9. **Innovation und Technologie**

   Innovation und Technologie bewerten die Einführung neuer und fortschrittlicher Lösungen im Fernwärmenetz. Dieses Kriterium bewertet, inwieweit moderne Technologien in das System integriert werden, um die Nachhaltigkeitsleistung zu verbessern. Algorithmen, die dieses Kriterium bewerten, stufen das Netz danach ein, wie gut es technologische Innovationen nutzt, die die Nachhaltigkeit verbessern, wie zum Beispiel intelligente Zähler, fortschrittliche Datenanalysen und die Integration erneuerbarer Energien. Fernwärmesysteme könnten dieses Kriterium bewerten, indem sie den Prozentsatz der Investitionen in neue oder innovative Betriebstechnologien oder den Prozentsatz der Investitionen in Forschung und Entwicklung berechnen.

10. **Anpassungsfähigkeit an zukünftige Bedürfnisse**

Die Anpassungsfähigkeit an zukünftige Bedürfnisse ist ein wichtiges Kriterium, das die Fähigkeit des Fernwärmenetzes bewertet, sich an veränderte Anforderungen, technologische Fortschritte und regulatorische Änderungen anzupassen. Algorithmen, die die Anpassungsfähigkeit bewerten, vergeben eine Nachhaltigkeitsbewertung basierend auf der Flexibilität des Netzes, neue Technologien zu integrieren, zukünftige Energiebedarfe zu decken und neue Vorschriften zu erfüllen, um so eine langfristige Nachhaltigkeit sicherzustellen.

11. **Lokale Wirtschaftsentwicklung**

    Die lokale Wirtschaftsentwicklung bewertet den Einfluss des Fernwärmenetzes auf die lokale Wirtschaft, einschließlich der Schaffung von Arbeitsplätzen, der Unterstützung lokaler Unternehmen und des regionalen Wirtschaftswachstums (Allevi et al. 2023; Qiu et al. 2023). Dieses Kriterium bewertet, wie das Netz zum wirtschaftlichen Wohlstand der Gemeinden beiträgt, die es versorgt. Algorithmen, die die lokale Wirtschaftsentwicklung bewerten, stufen das Netz danach ein, wie gut es wirtschaftliche Aktivitäten stimuliert, lokale Industrien unterstützt und wirtschaftliche Resilienz fördert.

12. **Einhaltung gesetzlicher Vorschriften**

    Die Einhaltung gesetzlicher Vorschriften ist entscheidend, um sicherzustellen, dass Fernwärmenetze im Rahmen der gesetzlichen Vorgaben für Umwelt- und Sicherheitsstandards betrieben werden (Munćan et al. 2023). Dieses Kriterium bewertet die Einhaltung relevanter Vorschriften durch das Netz, einschließlich Emissionsstandards und Energieeffizienzvorgaben. Algorithmen zur Bewertung der Compliance stufen das Netz basierend auf seiner Fähigkeit ein, diese gesetzlichen Anforderungen zu erfüllen, und gewährleisten so den Betrieb im Einklang mit Umwelt- und Sicherheitsgesetzen.

13. **Materialbeständigkeit und Langlebigkeit**

    Die Materialbeständigkeit und Langlebigkeit bewerten die Nachhaltigkeit der Materialien, die beim Bau und Betrieb von Fernwärmenetzen verwendet werden (Hay et al. 2020a, Hay et al. 2020b, Banushi et al. 2021). Dieses Kriterium bewertet die Lebensdauer und Beständigkeit der Materialien, die entscheidend sind, um häufige Ersetzungen zu vermeiden und die Umweltbelastung zu minimieren. Algorithmen, die dieses Kriterium bewerten, stufen das Netz basierend auf der Nachhaltigkeit der Materialauswahl ein, wobei langlebige und umweltfreundliche Materialien im Vordergrund stehen.

14. **Wärmeverteilungseffizienz**

    Die Wärmeverteilungseffizienz bewertet die Effektivität des Wärmeverteilungssystems innerhalb des Fernwärmenetzes. Dieses Kriterium berücksichtigt Faktoren wie Wärmeverluste während der Verteilung und die Effizienz des Systemdesigns (Guo et al. 2024; Topal und Arabkoohsar 2024; Malcher & Gonzalez-Salazar 2024). Algorithmen, die die Wärmeverteilungseffizienz bewerten, vergeben eine Nachhaltigkeitsbewertung basierend auf der Fähigkeit des Netzes, thermische Verluste zu minimieren und eine effiziente Wärmelieferung an Endverbraucher sicherzustellen.

15. **Bürgerbeteiligung**

    Die Bürgerbeteiligung bewertet die Einbindung lokaler Gemeinschaften in die Planung, Entwicklung und den Betrieb von Fernwärmenetzen. Dieses Kriterium beurteilt die Transparenz des Entscheidungsprozesses und in welchem Umfang das Feedback der Gemeinschaft berücksichtigt wird (Gorroño-Albizu und Godoy 2021). Algorithmen, die die Bürgerbeteiligung bewerten, stufen das Netz nach seiner Fähigkeit ein, die Öffentlichkeit einzubeziehen, Meinungen zu sammeln und

sicherzustellen, dass das System die Bedürfnisse und Erwartungen der Gemeinschaft erfüllt.

16. **Monitoring und Berichterstattung**
    Monitoring und Berichterstattung bewerten die Transparenz und Verantwortlichkeit der Leistungsüberwachung des Fernwärmenetzes. Dieses Kriterium berücksichtigt die Effektivität der Überwachungssysteme und die Qualität der Leistungsberichte (ECEEE 2021 Summer Study on energy efficiency 2021). Algorithmen, die dieses Kriterium bewerten, vergeben eine Nachhaltigkeitsbewertung basierend auf der Fähigkeit des Netzes, wichtige Nachhaltigkeitsindikatoren zu verfolgen und zu berichten, was eine kontinuierliche Verbesserung ermöglicht und sicherstellt, dass die Interessengruppen über die Nachhaltigkeitsleistung des Netzes informiert sind.
17. **Abfallwirtschaft**
    Die Abfallwirtschaft bewertet die Nachhaltigkeit des Umgangs mit Abfällen, die während des Baus, des Betriebs und der Wartung des Fernwärmenetzes entstehen. Dieses Kriterium erfasst Maßnahmen zur Minimierung der Abfallproduktion, zur Förderung des Recyclings und zur Sicherstellung umweltgerechter Entsorgungsverfahren. Algorithmen zur Bewertung der Abfallwirtschaft analysieren, inwieweit in Bezug auf das Wärmenetz nachhaltiges Abfallmanagement umgesetzt, die Umweltbelastung reduziert und die Vorschriften zur Abfallwirtschaft eingehalten werden.
18. **Erhaltung der Biodiversität**
    Biodiversitätskonservierung bewertet die Auswirkungen des Fernwärmenetzes auf lokale Ökosysteme sowie die Bemühungen zum Schutz der Biodiversität. Dieses Kriterium berücksichtigt die potenziellen Auswirkungen des Netzwerks und den Übergang von fossilen Brennstoffen zu lokal bereitgestellten Biokraftstoffen wie Torf und Holz auf Flora und Fauna, insbesondere in Gebieten, in denen die Entwicklung natürliche Lebensräume beeinträchtigen könnte (Vainio et al., 2024). Algorithmen, die die Biodiversitätskonservierung bewerten, vergeben eine Nachhaltigkeitsbewertung, die auf der Fähigkeit des Netzwerks basiert, seine Auswirkungen auf die Biodiversität zu minimieren und zum Schutz lokaler Ökosysteme beizutragen.

4.2 Methodik zur Katalogerstellung

Autoren: Pakdad Langroudi, Stefan Dollhopf (HCU) und Maria Schwarze (3S Consult)

Die Erstellung des Kriterienkatalogs zur Nachhaltigkeitsbewertung von Fernwärmenetzen erfolgte nach einer rigorosen und kooperativen Methodik. Dieser Prozess wurde so gestaltet, dass die Kriterien die spezifischen Herausforderungen und Chancen im Bereich der Nachhaltigkeit von Fernwärmesystemen umfassend abdecken. Die Methodik gliedert sich in folgende Schritte:

I. **Literaturrecherche und vorläufige Kriterienidentifikation**
   Eine gründliche Überprüfung der bestehenden Literatur wurde durchgeführt, um Nachhaltigkeitskriterien zu identifizieren, die für Fernwärmenetze relevant sind. Diese Überprüfung umfasste wissenschaftliche Forschung, Branchenberichte und bewährte Leitlinien, die speziell auf Fernwärmesysteme ausgerichtet sind. Ziel war es, eine Liste potenzieller Kriterien zusammenzustellen, die die verschiedenen Aspekte der Nachhaltigkeit – ökologisch, sozial und wirtschaftlich – im Kontext von Fernwärme widerspiegeln.

II. Entwicklung eines ersten Kriterienkatalogs

Basierend auf den Ergebnissen der Literaturrecherche wurde ein erster Satz von Kriterien vorgeschlagen. Dieser Katalog wurde entwickelt, um die wesentlichen Nachhaltigkeitsaspekte, die für Fernwärmenetze von Bedeutung sind, zu erfassen, wobei jedes Kriterium mit detaillierten Definitionen und Begründungen versehen wurde. Der anfängliche Kriterienkatalog diente als Grundlage für die weitere Verfeinerung und Validierung durch die Einbindung von Interessengruppen.

III. Fragebogengestaltung und -verteilung

Um die vorgeschlagenen Kriterien zu verfeinern und zu validieren, wurde ein detaillierter Fragebogen entwickelt und an die Konsortialmitglieder, die in Fernwärmeprojekten involviert sind, verteilt. Der Fragebogen war so strukturiert, dass er Feedback zur Relevanz, Wichtigkeit und Anwendbarkeit jedes Kriteriums sammelte. Dies ermöglichte den Teilnehmern, sowohl quantitative Bewertungen als auch qualitative Einblicke zu geben. Dieser Ansatz stellte sicher, dass die Kriterien durch das Fachwissen und die Erfahrung von Praktikern und Interessengruppen im Fernwärmesektor gestützt wurden.

IV. Datenerhebung und Einbindung der Forschungspartner „SAM-FW“

Der Fragebogen wurde an elf Teilnehmende verteilt, die zehn Organisationen des Konsortiums vertraten und über Fachkenntnisse in unterschiedlichen Aspekten der Fernwärme verfügten. Der Datenerhebungsprozess wurde so gestaltet, dass ein breites Spektrum an Perspektiven erfasst wurde, um sicherzustellen, dass die Kriterien das kollektive Wissen und die Prioritäten der Konsortialmitglieder widerspiegeln. Das Feedback der Teilnehmer war entscheidend für die Gestaltung des endgültigen Kriterienkatalogs. Die Abbildung 15 zeigt das Ergebnis der Umfrage und den Mittelwert der einzelnen Kriterien. Dabei gilt, je höher das Ergebnis, um so wichtiger das Kriterium für Bewertung der Nachhaltigkeit im Asset Management.

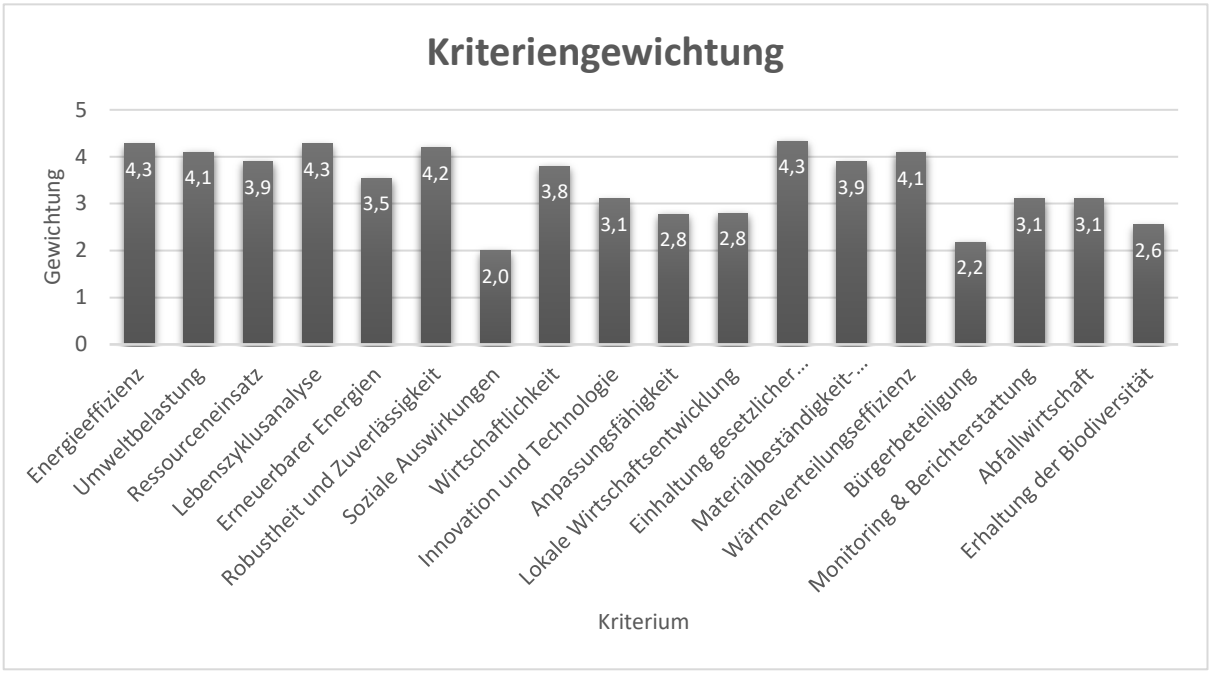


Abbildung 15 Das Ergebnis der Umfrage und der Mittelwert der einzelnen Kriterien basieren auf den Antworten der 11 Teilnehmer des Konsortiums

V. **Datenanalyse, Verfeinerung der Kriterien und Finalisierung der Kriterien**

Die Antworten aus dem Fragebogen wurden systematisch analysiert, wobei die Teilnehmer jedes Kriterium auf einer Skala von 0 (niedrigste) bis 5 (höchste) bewerten konnten. Eine „Keine-Angabe“-Option war für Teilnehmer vorgesehen, die über kein Fachwissen zu einem bestimmten Kriterium verfügten, sodass deren fehlende Eingaben die Ergebnisse nicht verfälschten. Diese Antworten wurden quantitativ analysiert, um die Bedeutung der einzelnen Kriterien zu bewerten, und qualitativ, um tiefere Einblicke in die Herausforderungen und Bedürfnisse im Zusammenhang mit Fernwärmenetzen zu gewinnen. Nicht-Angaben wurden aus der Analyse ausgeschlossen, um die Integrität der Ergebnisse zu wahren.

Nach Treffen und Diskussionen mit Experten des Konsortiums wurde versucht, die Anzahl der Kriterien zu reduzieren, um die Umsetzbarkeit innerhalb der Projektlaufzeit zu gewährleisten. Der Schwerpunkt lag auf der Verfeinerung der Kriterien auf Basis der Datenverfügbarkeit und ihrer Quantifizierbarkeit, unter Beibehaltung der Ausrichtung an den übergeordneten Nachhaltigkeitszielen für Fernwärmenetze. Nach der Verfeinerung wurden die Kriterien vom Konsortium überprüft und validiert, um ihre praktische Anwendbarkeit in der Algorithmusentwicklung zu bestätigen. Diese endgültige Auswahl der Kriterien wurde anschließend in ein robustes Rahmenwerk integriert, das die Nachhaltigkeit von Fernwärmesystemen bewertet.

Die 18 Nachhaltigkeitskriterien wurden in bilateralen Abstimmungen reduziert, da festgestellt wurde, dass manche eher dem Erzeugungssektor zugeordnet oder aufgrund fehlender zugrunde liegender Werte aktuell nicht bestimmt werden können. Das Kriterium “Monitoring & Berichterstattung” wird aufgrund fehlender detektierter Kennzahlen verworfen. Die Kriterien "Energieeffizienz” und “Erneuerbare Energien” wurden dem Bereich der Erzeugung zugeordnet. Das Kriterium "Robustheit" wird aufgrund des inhaltlichen Zusammenhangs dem Kriterium "Materialbeständigkeit-Langlebigkeit" zugeordnet. Das Kriterium “ökologische Qualität” wird durch die “Ökobilanz” bewertet. Die Lebenszyklusanalyse wird als Werkzeug angesehen, um eine Datengrundlage für die Ermittlung von Kennzahlen zu schaffen.

In Tabelle 6 sind die verbliebenen acht Nachhaltigkeitskriterien dargestellt.

Tabelle 9: Zuordnung der Kriterien zur Nachhaltigkeitssäule

Kriterium	Nachhaltigkeitssäule	Wertung aus Umfrage
Ökologische Qualität / Umweltwirkung	Ökologie	4,10
Ressourceneinsatz	Ökologie / Ökonomie	3,90
Zuverlässigkeit und Materialbeständigkeit-Langlebigkeit	Ökologie / Ökonomie / Soziales	4,20 3,89
Soziale Auswirkungen	Soziales	2,00
Wirtschaftlichkeit	Ökonomie	3,80
Anpassungsfähigkeit an zukünftige Bedürfnisse	Ökonomie / Soziales	2,78
Wärmeverteilungseffizienz	Ökologie / Ökonomie	4,09

Abfallwirtschaft	Ökologie	3,10

Die folgende Abbildung 16 soll diese Einordnungen veranschaulichen:



Abbildung 16: Einordnung der Kriterien in das Nachhaltigkeitsdreieck

Die einzelnen Nachhaltigkeitskriterien spiegeln sich, sofern möglich, in den Kennzahlen (Key Performance Indicators) wider (siehe Kapitel 5) und werden im Rahmen des Projektes für das Asset Management von Fernwärmenetzen weiterentwickelt.

4.3 Integration von Nachhaltigkeitsaspekten in die Kriterien für Algorithmen

Autoren: Pakdad Langroudi, Stefan Dollhopf (HCU) und Maria Schwarze (3S Consult)

Die Integration von Nachhaltigkeitsaspekten in die Entwicklung von Algorithmen für Fernwärmenetze ist entscheidend für die Schaffung von Systemen, die Umwelt-, Sozial- und Wirtschaftsziele in Einklang bringen. Die in diesem Katalog aufgeführten Kriterien sind darauf ausgelegt, die speziellen Nachhaltigkeitsherausforderungen im Zusammenhang mit Fernwärmenetzen anzugehen und sicherzustellen, dass die Algorithmen positiv zu allen drei Säulen der Nachhaltigkeit beitragen.

I. **Ökologische Nachhaltigkeit**
   Die ökologische Nachhaltigkeit in Fernwärmenetzen wird durch Kriterien wie Ökologische Qualität, Umweltwirkung und Ressourceneinsatz angesprochen. Diese Kriterien konzentrieren sich darauf, die ökologischen Auswirkungen von Fernwärmenetzen zu minimieren, indem der Energieverbrauch gesenkt, die Emissionen reduziert, der Ressourcennutz optimiert und lokale Ökosysteme erhalten werden. Algorithmen, die unter Berücksichtigung dieser Kriterien entwickelt werden, sollen die Umweltleistung von Fernwärmesystemen verbessern und eine nachhaltige Energiezukunft fördern.

II. Soziale Nachhaltigkeit

Die soziale Nachhaltigkeit ist ein wichtiger Aspekt bei der Entwicklung von Fernwärmenetzen und wird vor allem durch das Kriterium der sozialen Auswirkungen berücksichtigt. Dieses Kriterium betont die Bedeutung des gerechten Zugangs zu Heizwärme, der Einbeziehung der Gemeinschaft in Entscheidungsprozesse und der Förderung der lokalen Wirtschaftsentwicklung. Durch die Integration dieser Kriterien in die Algorithmusentwicklung können Fernwärmenetze zur sozialen Gerechtigkeit beitragen, die öffentliche Gesundheit und Sicherheit verbessern und das Wachstum lokaler Gemeinschaften unterstützen.

III. Ökonomische Nachhaltigkeit

Die ökonomische Nachhaltigkeit ist entscheidend für die langfristige Gebrauchsdauer von Fernwärmenetzen. Kriterien wie Wirtschaftlichkeit, Innovation und Technologie sowie Anpassungsfähigkeit an zukünftige Bedürfnisse konzentrieren sich darauf, die finanzielle Leistung von Fernwärmesystemen zu optimieren, technologische Innovationen zu fördern und die Anpassungsfähigkeit an zukünftige Anforderungen sicherzustellen. Algorithmen, die diese Kriterien berücksichtigen, sind darauf ausgelegt, die wirtschaftliche Effizienz von Fernwärmenetzen zu erhöhen und sie langfristig attraktiver und nachhaltiger zu machen.

Die Integration dieser Nachhaltigkeitsaspekte in den Algorithmus Entwicklungsprozess gewährleistet, dass Fernwärmenetze so gestaltet und betrieben werden, dass sie den aktuellen und zukünftigen Bedürfnissen der Gesellschaft gerecht werden, während negative Umweltauswirkungen minimiert und wirtschaftliche Vorteile maximiert werden. Dieser ganzheitliche Ansatz zur Bewertung der Nachhaltigkeit ist entscheidend für die erfolgreiche Implementierung und den Betrieb von Fernwärmesystemen, die sowohl widerstandsfähig als auch nachhaltig sind.

5. Entwicklung eines Kennzahlensystems (KPI-System) für Fernwärmenetze

Autoren: Maria Schwarze und Ingo Kropp (3S Consult)

5.1 Zielstellung

Ein Ziel im Projekt ist der Aufbau eines Kennzahlensystems für die Leitungen eines Fernwärmenetzes mit Fokus auf Nachhaltigkeit und Instandhaltung. Für jede Kennzahl soll eine Beschreibung der zugrunde liegenden Datenanforderungen, der Berechnungsvorschriften und der eventuell identifizierten Bewertungsmaßstäbe erarbeitet werden.

5.2 Vorgehensweise

Zunächst wurde eine Literaturrecherche durchgeführt. Daraus wurde eine Vorauswahl von möglichen geeigneten Key Performance Indicators (KPI) getroffen. Diese Liste wurde im Projektkonsortium sowie im fachlichen Austausch auf nationaler und internationaler Ebene während verschiedener IEA DHC TS6-Workshops (u.a. in Göteborg, 2023 und Dresden, 2024) vorgestellt und diskutiert. Zur Bewertung der vorausgewählten KPIs wurde zusätzlich eine Umfrage im Projektkonsortium durchgeführt bzw. auch in bilateralen Interviews mit nationalen und internationalen Fernwärmenetzbetreibern diskutiert. Die KPIs wurden darüber hinaus noch im Hinblick auf ausgewählte Nachhaltigkeitskriterien eingeordnet.

5.3 Anforderungen an das Kennzahlensystem

Die Kennzahlen sollen allgemeingültig auf alle Fernwärmenetze anwendbar sein und unter Berücksichtigung von deren Individualität die Netzbetreiber bei der Optimierung ihres Asset Managements unterstützen. Die Eingabeparameter für die Indikatoren sollen möglichst leicht verfügbar sein. Die Berechnungsvorschriften sollen verständlich sein, so dass jeder Indikator möglichst leicht abzuleiten ist.

Bei der Verwendung von Kennzahlen sollte der Anwender sich der Manipulationsmöglichkeit (bspw. durch Auswahl von Kennzahlen, die nur die eigenen Bedürfnisse und Ansichten widerspiegeln), der Gefahr von Fehlinterpretation, der Grenzen der Informationsverdichtung (Qualität der rohen zu Grunde liegenden Daten ist dabei essenziell), der Gefahr der Verengung der Sichtweise (nicht berücksichtigte Themen sind dennoch in der Realität vorhanden) und somit der Gefahr von Fehlsteuerung (Konzentration der Bemühungen auf kennzahlenrelevante Aspekte) bewusst sein.

Folgende Informationen sollten nach (Neely 1997) für Kennzahlen u.a. erfasst werden:

- Name der Kennzahl („Measure“)
- Zweck und Begründung der Kennzahl („Purpose“)
- einfließende Variablen („relates to“)
- Zielgröße („target“)
- Gleichung („formula“)
- Häufigkeit der Erhebung („frequency“)
- Verantwortlichkeit Datenerhebung („who measures?“)
- Datenquelle („source of data“)
- Verantwortlichkeit Datenauswertung („who acts on the data?“)
- Beschreibung der Datenauswertung („what do they do?“)
- Anmerkungen („notes and comments“)

Die meisten der oben genannten Information wurden im Folgenden bei der Vorstellung der ausgewählten Kennzahlen bereits in den Übersichten aufgenommen. U.a. Verantwortlichkeiten können erst im direkten Unternehmenskontext der Netzbetreiber festgelegt werden.

5.4 Literaturrecherche zu Kennzahlen

Es wurden mehr al Dokumente nach möglichen Kennzahlen durchsucht. Dabei wurden Normen, Masterarbeiten, Forschungsprojekte und Veröffentlichungen von Unternehmen/Netzbetreibern berücksichtigt. Die Dokumente waren sowohl in Deutsch als auch in Englisch verfasst. Es erfolgte keine Beschränkung auf die Sparte Fernwärme. Es wurden ebenfalls Quellen aus den Sparten Trinkwasser, Abwasser, IT und Logistik durchgearbeitet. Die einzelnen Literaturquellen sind im Kapitel 10 Anhang jeweils mit einer Kurzbeschreibung aufgeführt.

5.5 Vorschlag für ein Kennzahlensystem mit Fokus auf Nachhaltigkeit und Instandhaltung

5.5.1 Übersicht zu ausgewählten Kennzahlen

Aus den rund 35 Dokumenten wurden mögliche Kennzahlen in eine Liste eingepflegt. Die Liste umfasst 117 Einträge, von denen 98 einen Bezug zum Versorgungsnetz haben. Jede Kennzahl wurde den Kategorien Ökonomie, Ökologie und Soziales im Nachhaltigkeitsdreieck zugeordnet. Zusätzlich wurde die Kategorie Technische Kennzahl ergänzt. Eine Zuordnung einer Kennzahl zu mehreren Kategorien ist möglich. Eine Kategorie “Digitalisierung” befindet sich derzeit noch im Entwurf, soll aber zukünftig implementiert werden. Weiterhin wird jede Kennzahl gemäß ihrer Art eingeordnet – rein informative Kennzahlen dienen der Netzbeschreibung, wie bspw. Leitungslänge oder Betriebstemperatur. Bei anderen Kennzahlen ist es möglich eine Bewertung vorzunehmen und gegebenenfalls einen Zielbereich oder einen Zielwert vorzugeben, bspw. die Kennzahl „Schadensrate“. Außerdem werden alle Kennzahlen bezüglich ihrer Betrachtungsebene (Gesamtnetz oder einzelne Betriebsmittel), Prognostizierbarkeit, Ermittlungsart (Messung oder Bilanzierung/Berechnung) und einer ggf. bereits vorhandenen Berechnungsvorschrift charakterisiert.

Die folgenden Kennzahlen gemäß Tabelle 10 werden vorgeschlagen, um eine Bewertung der Leitungen eines Fernwärmenetzes vorzunehmen:

Tabelle 10: Vorschlag für Key Performance Indicators für Fernwärmeversorgungsnetze

Kennzahlen	Kategorie				Art	Komplexität	Zielwert / Zielbereich	Umfrage
	Technisch	Ökonomisch	Ökologisch	Soziales	Informativ / Bewertung			Bedeutungseinschätzung (Zwischenstand 16.09.2024) Skala: 1 - 5
Leitungslänge gemäß Verlegesystem	X				Informativ	niedrig	-	3,7
Altersstruktur / Mittleres Alter	X				Informativ	niedrig	-	3,8
Nutzungsdauer	X	X	X		Bewertung	mittel	Laufende Forschungsarbeit	4,7
Substanzwert	X	X	X		Bewertung	niedrig	40% - 60%	4,0
(Altersabhängige) Schadensrate	X	X	X		Bewertung	niedrig	Noch zu definieren DVGW-Werte ggf. zu hoch	3,9
Wärmeverluste	X	X	X		Bewertung	hoch	Noch zu definieren 10-15% in Umfrage	4,0
Wasserverluste	X	X	X		Bewertung	hoch	1 Netzvolumen? (FW 115)	4,6
Versorgungszuverlässigkeit	X			X	Bewertung	hoch	Noch zu definieren	4,3
CO_2			X		Bewertung	hoch	Noch zu definieren	3,4
OPEX (Betriebs- und Instandhaltungskosten)		X		X	Bewertung	niedrig	Noch zu definieren	3,1
CAPEX (Investitionskosten)		X		X	Bewertung	niedrig	Noch zu definieren	3,8
(Temperaturniveau)	X				Informativ		-	-

Als Datengrundlage werden Bestands- und Schadensdaten (inkl. Geo-Daten), ein hydraulisches Netzmodell, Messwerte und Betriebsdaten und Informationen aus der Buchhaltung verwendet. Dabei gilt: Je umfangreicher die Datengrundlage und je höher deren Qualität, desto aussagekräftiger werden die Kennzahlen. Abbildung 17 veranschaulicht die Zusammenhänge und Abhängigkeiten der ausgewählten Kennzahlen ausgehend von der Datenquelle. Die farbliche Darstellung der Kennzahlen richte sich nach der Zuordnung in das erweiterte Nachhaltigkeitsdreieck in Abbildung 19.

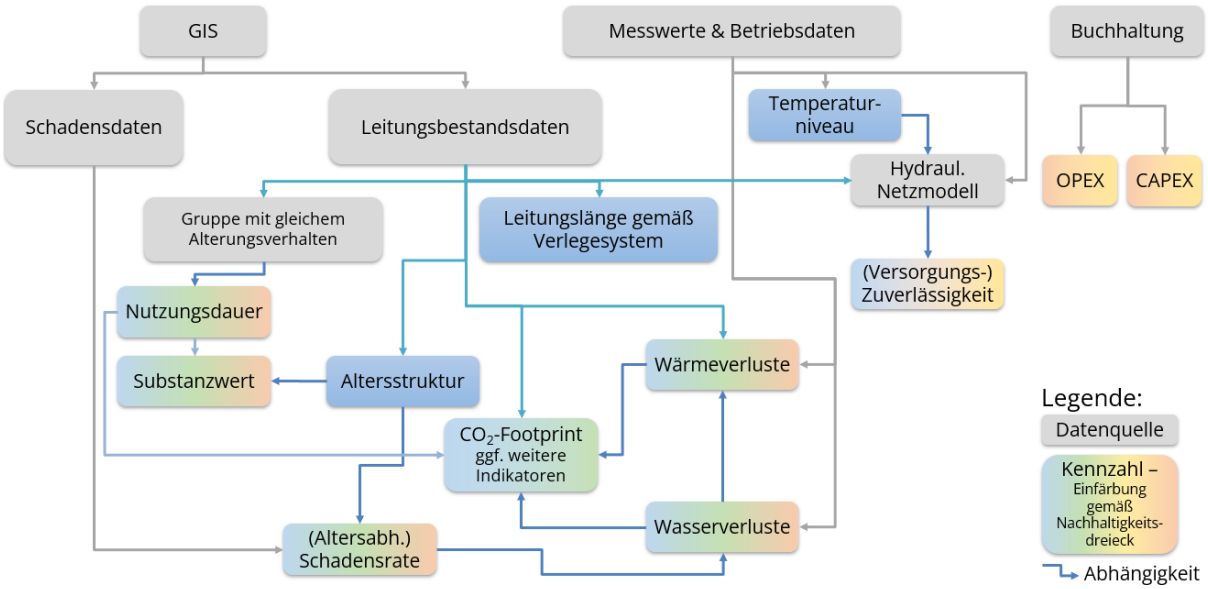


Abbildung 17: Aktueller Stand erarbeitete Kennzahlen - Abhängigkeiten und Zusammenhänge, welche im Rahmen des Projekts erweitert und angepasst werden. Quelle: 3S Consult GmbH

Je nach Kontext der verwendeten Kennzahlen kann es sinnvoll sein, anstatt der Leitungslänge als Bezugsgröße die Trassenlänge zu verwenden, z.B. bei Kostengrößen, die sich häufig eher auf die Trasse beziehen.

5.5.2 Umfrage zum Kennzahlensystem

Es wurde eine Umfrage zu den Kennzahlen mit folgenden Punkten gestellt:

- Wie relevant wird diese Kennzahl eingeschätzt?
- Wird diese Kennzahl bereits verwendet oder ist eine Nutzung künftig geplant?
- Einordnung der Bedeutung (Skala 1 bis 5: 1 = keine Bedeutung ... 5 = große Bedeutung)
- Gibt es bereits eine Berechnungsvorschrift für diese Kennzahl?
- Datenanforderungen bzw. Datenverfügbarkeit
- Zielwert oder Zielkorridor
- Sonstige Anmerkungen

Die Umfrage wurde sowohl an Teilnehmer aus dem Konsortium versendet als auch an Fernwärmenetzbetreiber, mit denen dann vorrangig bilaterale Interviews geführt worden sind. Es gab 4 Rückmeldungen aus dem Konsortium und 5 Antworten von Netzbetreibern.

Als interessant hervorzuheben ist, dass die Netzbetreiber den vorgeschlagenen Kennzahlen oft eine geringere Bedeutung beimessen als die Einschätzung durch das Konsortium. Die beiden informativen Kennzahlen “Altersstruktur” und “Anteil Verlegesysteme” wurden eher als Datengrundlage und nicht als eigenständige Kennzahl betrachtet.

Kennzahlen erhielten auch eine geringere Bedeutung, wenn die Datengrundlage zur Ermittlung bei den Netzbetreibern nicht vollständig verfügbar ist.

Bei der Kennzahl “CO_2” wurde Interesse auf Seiten der Fernwärmenetzbetreiber bekundet, jedoch sind geeignete Berechnungsmaßstäbe und erforderliche Datengrundlagen bisher nicht vorhanden. Daher wurde deren Bedeutung als niedrig eingeschätzt.

Für die Kennzahlen “Nutzungsdauer”, “Substanzwert”, “Wasserverluste”, “Versorgungszuverlässigkeit” und “CAPEX” war die Bedeutungseinschätzung beider Gruppen ähnlich.

In der nachfolgenden Grafik ist die Einschätzung der Bedeutung der einzelnen Kennzahlen aus der Umfrage dargestellt.

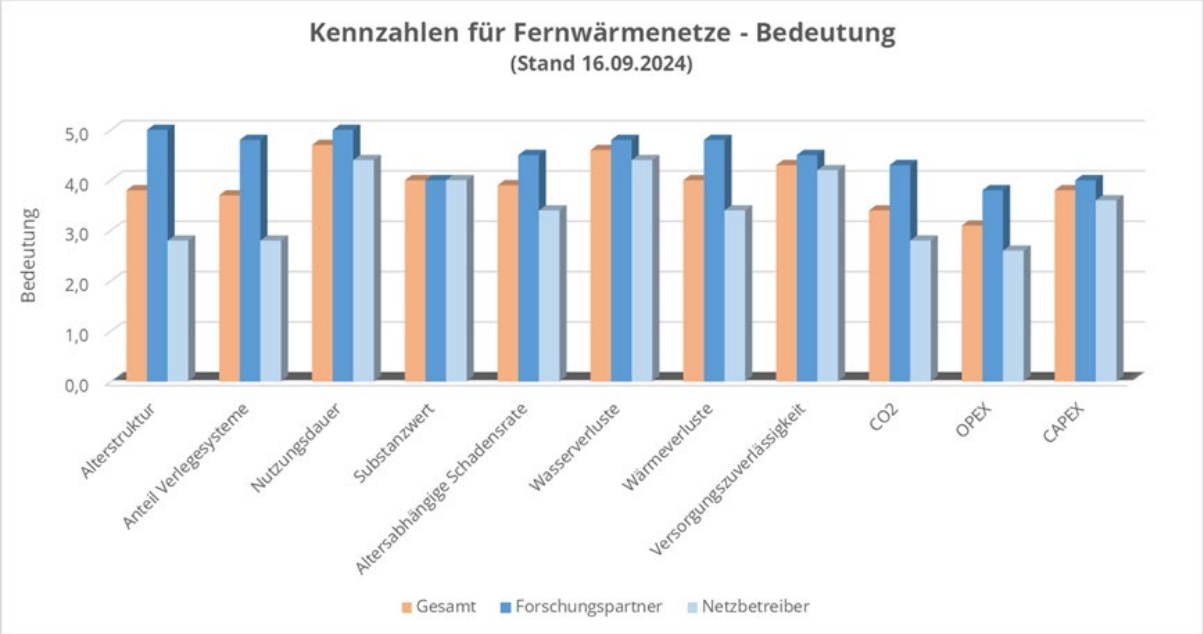


Abbildung 18: Bewertung der erarbeiteten Kennzahlen durch die SAM-FW Projektpartner (Quelle: 3S Consult GmbH)

5.5.3 Kennzahl “Leitungslänge pro Verlegesystem”

Tabelle 11: Tabellarische Übersicht zur Kennzahl „Leitungslänge pro Verlegesystem"

Kennzahlname	“Leitungslänge pro Verlegesystem”
Kategorie	Technisch
Art	Informativ
Betrachtungsebene	Netz & Betriebsmittelgruppe[2]
Ermittlung	Für Bestand & Prognose durch Simulation möglich
Komplexität	niedrig
Ermittlungsmethode	Über Bilanzierung Zumeist aus vorhandenen GIS-Daten
Berechnungsansatz	$Länge_{Netz} = \sum Länge_i$ $Länge_{Verlegesystem\ a} = \sum Länge_{i,Verlegesystem\ a}$

[2] Leitungen in einem Wärmenetz können in Betriebsmittelgruppen (BMG) eingeteilt werden. Leitungen, die einer BMG zugeordnet sind, weisen im Sinne des Asset Managements ein ähnliches Alterungs- bzw. Störungsverhalten auf. In Wärmenetzen werden üblicherweise die beiden Eigenschaften Verlegesystem und Verlegart zur Einteilung in BMG verwendet, z.B. erdverlegtes Kunststoffmantelrohr. Darüber hinaus kann es auch sinnvoll sein, die Einbauperiode als weiteres Klassifizierungsmerkmal zu verwenden.

KennzahlName	“Leitungslänge pro Verlegesystem”
	$Länge_i$ = Rohrleitungslänge eines einzelnen Rohrstranges $Länge_{i,Verlegesystem\ a}$ = Rohrleitungslänge eines einzelnen Rohrstranges, welches einem Verlegesystem a (bspw. KMR, SMR, etc.)angehört
Zielwert bzw. -bereich	Nicht relevant
Benötigte Daten	Leitungen mit ID und Angaben zur Länge; weitere Informationen, z.B. Baujahr, Nennweite, Verlegesystem, Verlegeart, Material, …

Die Leitungslänge (Rohrleitungslänge) [km] klassifiziert nach Verlegesystem charakterisiert ein Wärmenetz als rein informative technische Kennzahl ohne eine direkte Bewertung vorzunehmen. Zur Ermittlung der Längenverteilung eines Netzes muss für jeden Leitungsabschnitt dessen individuelle Leitungslänge bekannt sein. Zur weiteren Unterscheidung von Leitungsgruppen sollten für die Leitungen zusätzliche Attribute, wie z.B. Verlegesystem, Material oder Verlegeart bekannt sein. Da die Bestandsdaten bei den Netzbetreibern meist in einem GIS-System gepflegt werden, wird die Komplexität der Beschaffung der Daten und Berechnung dieser Kennzahl als niedrig eingestuft.

5.5.4 Kennzahl “Altersstruktur”

Tabelle 12: Tabellarische Übersicht zur Kennzahl „Altersstruktur"

KennzahlName	“Altersstruktur”
Kategorie	Technisch
Art	Informativ
Betrachtungsebene	Netz + Betriebsmittelgruppe
Ermittlung	Für Bestand & Prognose durch Simulation möglich
Komplexität	Niedrig
Ermittlungsmethode	Über Bilanzierung Zumeist aus vorhandenen GIS-Daten
Berechnungsansatz	Formel zur Berechnung des Alters eines Rohrleitungsabschnittes: $$Alter_i = Bezugsjahr - Baujahr_i$$ Formel zur Berechnung des mittleren Netzalters: $$Alter_{Netz} = Bezugsjahr - \frac{\sum(Baujahr_i * Länge_i)}{\sum Länge_i}$$

Kennzahlname	"Altersstruktur"
	$Alter_i$ = Alter eines Rohrstranges im Bezugsjahr $Baujahr_i$ = Baujahr eines Rohrstranges $Länge_i$ = Rohrleitungslänge eines einzelnen Rohrstranges
Zielwert bzw. -bereich	Nicht relevant
Benötigte Daten	Leitungen mit ID und Angaben zu Länge; weitere Informationen, z.B. Baujahr, Nennweite, Verlegesystem, Verlegeart, Material, …

Die Altersstruktur [a] charakterisiert ein Wärmenetz als rein informative technische Kennzahl ohne eine direkte Bewertung vorzunehmen. Zur Ermittlung der Altersstruktur eines Netzes muss für jeden Leitungsabschnitt (i) neben der individuellen Leitungslänge auch das Installationsjahr bekannt sein. Zur weiteren Unterscheidung von Leitungsgruppen sollten für die Leitungen zusätzliche Attribute, wie z.B. Verlegesystem, Material oder Verlegeart bekannt sein. Da die Bestandsdaten bei den Netzbetreibern meist in einem GIS-System gepflegt werden, wird die Komplexität der Beschaffung der Daten und Berechnung dieser Kennzahl als niedrig eingestuft. Aus der Altersstruktur können verschiedene Netzausbauphasen abgeleitet werden. Aus den verfügbaren Daten kann auch ein längengewichtetes mittleres Alter [a] berechnet werden.

5.5.5 Kennzahl "Nutzungsdauer"

Tabelle 13: Tabellarische Übersicht zur Kennzahl „Nutzungsdauer"

Kennzahlname	"Nutzungsdauer"
Kategorie	Technisch, Ökonomisch, Ökologisch
Art	Bewertung
Betrachtungsebene	Netz & Betriebsmittel
Ermittlung	Für Bestand angestrebt
Komplexität	Mittel-Hoch
Ermittlungsmethode	Über Bilanzierung Zumeist aus vorhandenen GIS-Daten
Berechnungsansatz	Noch ergänzen als Ergebnis von SAM-FW
Zielwert bzw. -bereich	Laufende Forschungsarbeit
Benötigte Daten	Leitungen mit ID und Angaben zu Länge; weitere Informationen, z.B. Baujahr, Nennweite, Verlegesystem, Verlegeart, Material, …

Kennzahlname	“Nutzungsdauer”
	Forschungsarbeit notwendig zum besseren Verständnis von Alterungsprozessen

Die Nutzungsdauer [a] ist eine technische Kennzahl und beschreibt die Dauer der bestimmungsgemäßen Funktionstüchtigkeit. Sie ist u.a. abhängig vom Verlegesystem, der Verlegequalität, den Betriebsbedingungen (u.a. Betriebstemperatur) und anderen Einflussfaktoren. Zusätzlich wird diese Kennzahl den Bereichen „Ökonomie“ und „Ökologie“ zugeordnet. Bedingt durch Herstellung, Transport, Einbau, Betrieb und Außerbetriebnahme/Entsorgung entstehen Umweltbelastungen. Je länger die Nutzungsdauer einer Rohrleitung ist, desto geringer wird die Belastung pro Betriebsjahr. Entsprechend ist die Ermittlung von möglichst genauen Nutzungsdauern und deren potenzielle Verlängerung durch Sanierungsmaßnahmen von besonderer Bedeutung. Diese hohe Bedeutung wird durch die Ergebnisse in der Umfrage von Experten und Fernwärmeversorgern untermauert. Eine verbesserte Ermittlung von Nutzungsdauern ist Gegenstand von SAM-FW und wird im weiteren Projektverlauf integriert. Das grundsätzliche Verständnis geht davon aus, dass eine hohe Nutzungsdauer immer besser als eine niedrigere Nutzungsdauer ist.

In Tabelle 1 sind Mindestnutzungsdauern für einzelne Verlegesysteme aufgeführt. Abbildung 6 enthält als Ergebnis einer Umfrage unter Wärmenetzbetreibern eine Einschätzung der mittleren Nutzungsdauern einzelner Verlegesysteme.

5.5.6 Kennzahl “Substanzwert”

Tabelle 14: Tabellarische Übersicht zur Kennzahl „Substanzwert"

Kennzahlname	“Substanzwert”
Kategorie	Technisch
Art	Bewertung
Betrachtungsebene	Netz & Betriebsmittel
Ermittlung	Für Bestand & Prognose durch Simulation möglich
Komplexität	niedrig
Ermittlungsmethode	Über Bilanzierung
Berechnungsansatz	Berechnung des Substanzwertes für einen Rohrleitungsabschnitt: $$Substanzwert_i = \frac{Restnutzungsdauer_i}{Alter_i + Restnutzungsdauer_i}$$ Berechnung des Substanzwertes pro Verlegesystem: $$Substanzwert_{Verlegesystem} = \frac{\sum(Substanzwert_{i,Verlegesystem} * Länge_{i,Verlegesystem})}{\sum Länge_{i,Verlegesystem}}$$ Berechnung des Substanzwertes für das Gesamtnetz:

Kennzahlname	“Substanzwert”
	$$Substanzwert_{Netz} = \frac{\sum(Substanzwert_i * Länge_i)}{\sum Länge_i}$$ Alter$_i$ = Alter eines Rohrstranges im Bezugsjahr Restnutzungsdauer$_i$ = verbleibende Nutzungsdauer eines einzelnen Rohrstranges, in welchem er funktionsfähig ist Substanzwert$_i$ = verbleibender Substanzwert eines einzelnen Rohrstranges Länge$_i$ = Rohrleitungslänge eines einzelnen Rohrstranges
Zielwert bzw. -bereich	Noch für FW-Netze zu definieren Diskutierter Bereich: 40% – 60%
Benötigte Daten	Leitungen mit ID und Angaben zu Länge; weitere Informationen, z.B. Baujahr, Nennweite, Verlegesystem, Verlegeart, Material, … Informationen zur Nutzungsdauer

Der Substanzwert [%] ist eine technische Kennzahl und stellt eine prozentuale verbleibende Restnutzungsdauer dar. Die Grundlage für eine Substanzwertberechnung bildet eine möglichst gute Bestandsdatenbank und ein geeignetes Alterungsmodell mit Informationen zur Nutzungsdauererwartung. Exemplarisch können das Alterungsmodelle nach Herz oder Weibull sein. Für den Substanzwert kann ein Zielbereich angegeben werden. Dieser ist für FW-Netze bisher nicht abschließend diskutiert. Empfehlungen aus anderen Netzsparten und im Ergebnis der Projektumfrage innerhalb des Konsortiums gehen von einem Korridor zwischen 40% - 60% aus. Der Substanzwert sollte jährlich berechnet werden, um einen Trend zu erkennen und ggf. rechtzeitig durch Anpassung der künftigen Rehabilitationsvolumina gegenzusteuern, damit kein Rehabilitationsstau entsteht.

5.5.7 Kennzahl “(altersabhängige) Schadensrate”

Tabelle 15: Tabellarische Übersicht zur Kennzahl „(altersabhängige) Schadensrate "

Kennzahlname	“(altersabhängige) Schadensrate”
Kategorie	Technisch, Ökonomisch, Ökologisch
Art	Bewertung
Betrachtungsebene	Netz & Betriebsmittel
Ermittlung	Für Bestand & Prognose durch Simulation möglich
Komplexität	niedrig
Ermittlungsmethode	Über Bilanzierung

Kennzahlname	"(altersabhängige) Schadensrate"
	Möglich per vorhandenem GIS-System
Berechnungsansatz	Siehe auch Merkblatt AGFW FW 114 „Instandhaltungsstrategien und Rehabilitationsplanung, Mindestanforderungen" (AGFW FW 114, 2013) $$S = \frac{\frac{n_S}{l_G}}{1000} \left[\frac{1}{km}\right]$$ n_S = Anzahl der Schäden im betrachteten Alter l_G = Länge aller Betriebsmittel mit gleichem Alter wie das schadhafte Objekt die einer gemeinsamen Gruppe angehören [m]
Zielwert bzw. -bereich	Noch zu definieren In der Trinkwassersparte verwendete Bereiche für Netze (DVGW W 400-3, 2006): Bis 0,1 Schäden / km*a – niedrige Schadensrate 0,1 - 0,5 Schäden / km*a – mittlere Schadensrate ab 0,5 Schäden / km*a – hohe Schadensrate Für Fernwärmenetze ist das zu verifizieren
Benötigte Daten	Leitungen mit ID und Angaben zu Länge; weitere Informationen, z.B. Baujahr, Nennweite, Verlegesystem, Verlegeart, Material, … Schadensereignisse mit ID und Angaben zu Betriebsmittel-ID, Ereignisjahr/-datum, Schadensart, Schadensursache, …

Die (altersabhängigen) Schadensrate [Schäden/ km*a] ist eine technische Kennzahl, die auch den Kategorien Ökologie und Ökonomie zugeordnet werden kann, durch ihre Beziehung zu anderen Kennzahlen wie z.B. Wasserverluste, Reparaturkosten u.ä. Die Ermittlung der Kennzahl erfordert eine möglichst vollständige Bestands- und Schadensstatistik. Aus der Schadenstatistik kann für Leitungsgruppen bzw. auch einzelne Leitungen eine altersabhängige Schadensfunktion für Prognosen abgeleitet werden. Das individuelle Alterungs- und Schadensverhalten ist hierbei von verschiedenen Faktoren, z.B. Material, Verlegebedingungen, Betriebsbedingungen, Umgebung abhängig. Eine Aktualisierung sollte regelmäßig, z.B. jährlich, vorgenommen werden. Die Kennzahl kann einen Hinweis darauf geben, welche Leitungsgruppen bzw. Leitungen bevorzugt erneuert werden sollten. Zudem ist es möglich, zukünftig auftretende Reparaturkosten näherungsweise zu ermitteln und unterstützt somit die Budgetplanung. Zusätzlich sollte eine Schadensrate pro Kalenderjahr jährlich ausgewiesen werden. Der Berechnung dieser Kennzahl wird eine niedrige Komplexität zugeordnet. Die Definition von Zielwerten oder Zielbereichen für beide Schadensraten (pro Kalenderjahr und altersabhängig) steht noch aus.

5.5.8 Kennzahl “Wasserverluste”

Tabelle 16: Tabellarische Übersicht zur Kennzahl „Wasserverluste"

Kennzahlname	“Wasserverluste”
Kategorie	Technisch, Ökonomisch, Ökologisch
Art	Bewertung
Betrachtungsebene	Netz
Ermittlung	Für Bestand & Prognose durch Simulation möglich
Komplexität	hoch
Ermittlungsmethode	Über Bilanzierung & Messwerte
Berechnungsansatz	Siehe Merkblatt AGFW FW 115 „Wasserverluste in Fernwärmesystemen“ (AGFW FW 115, 2017)
Zielwert bzw. -bereich	Vom AGFW zur Orientierung verwendeter Bereich: 0,5 bis 1 Netzvolumen gilt als guter Wert (Kennzahl K_V im FW 115)
Benötigte Daten	Leitungen mit ID und Angaben zu Länge; weitere Informationen, z.B. Baujahr, Nennweite, Verlegesystem, Verlegeart, Material, … Schadensereignisse mit ID und Angaben zu Betriebsmittel-ID, Ereignisjahr, Schadensart, Schadensursache Daten aus Messstellen an den Nachfülleinrichtungen

Kennzahlname	“Wärmeverluste”
Kategorie	Technisch, Ökonomisch, Ökologisch
Art	Bewertung
Betrachtungsebene	Netz
Ermittlung	Für Bestand & Prognose durch Simulation möglich
Komplexität	hoch
Ermittlungsmethode	Über Bilanzierung & Messwerte
Berechnungsansatz	Vereinfacht: $Q_{Verlust} = Q_{Netzeinspeisung} - Q_{Kundenabnahme}$ Bzw. $Q_{rel.Verlust} = \frac{Q_{Netzeinspeisung} - Q_{Kundenabnahme}}{Q_{Netzeinspeisung}} * 100\ [\%]$
Zielwert bzw. -bereich	Noch zu definieren

Kennzahlname	“Wärmeverluste”
	Gemäß den Aussagen der Umfrageteilnehmer wird in der Praxis ein Wert von 10% - 15% Wärmeverlust als guter Wert angesehen
Benötigte Daten	Leitungen mit ID und Angaben zu Länge; weitere Informationen, z.B. Baujahr, Nennweite, Verlegesystem, Verlegeart, Material, … Daten aus Messstellen, u.a. an den Einspeisepunkten

Zur weiteren Einordnung dieser Kennzahl wird auf das Merkblatt „Wasserverluste in Fernwärmesystemen“ (AGFW FW 115, 2017) verwiesen.

5.5.9 Kennzahl “Wärmeverluste”

Tabelle 17: Tabellarische Übersicht zur Kennzahl „Wärmeverluste"

Wärmeverluste [%] entstehen während des Netzbetriebs entlang der Leitungen (siehe Kapitel 1.4 dieses Dokumentes) bzw. auch bei austretendem Wasser infolge von Schäden/Leckagen. Aufgrund der Alterung der Rohrleitungen nehmen die spezifischen Wärmeverluste mit der Zeit zu. Die Berechnung von Wärmeverlusten reicht von einfachen Ansätzen mit Wärmeverlustkoeffizienten für jede Leitung bis hin zu detaillierten Berechnungen mit Berücksichtigung der lokalen Umgebungsbedingungen der Leitungen. In der Bilanzierung wird diese Kennzahl zumeist als Differenz der von den Wärmeerzeugungsanlagen bereitgestellten Wärmeenergie und der bei den Fernwärmeverbrauchern abgerechneten Wärmeenergie ermittelt. Als Zielkorridor werden Werte von 10% bis 15% der in den Wärmeerzeugungsanlagen erzeugten Wärmeenergie als gut erachtet. Diese Werte wurden auch in den Umfragen zu den Kennzahlen genannt. Die Kennzahl Wärmeverluste sollte regelmäßig, z.B. einmal jährlich, ermittelt werden. Altersabhängige Wärmeverluste können Einsparpotenziale aufzeigen bzw. auch Eingang in die Bewertung der Leitungen im Rahmen des Asset Managements finden.

Der Versuch den Wärmeverlust über die altersabhängige Wärmeverlustfunktion einer Leitung und dem Wärmeverlust durch Schäden (altersabhängige Schadensrate mit Schadensverlauf inkl. entsprechendem Wasseraustritt mit Temperatur) zu prognostizieren ist Teil der Arbeiten in SAM-FW.

5.5.10 Kennzahl “Versorgungszuverlässigkeit”

Tabelle 18: Tabellarische Übersicht zur Kennzahl „Versorgungszuverlässigkeit"

Kennzahlname	“Versorgungszuverlässigkeit”
Kategorie	Technisch, Sozial
Art	Bewertung
Betrachtungsebene	Netz

Kennzahlname	“Versorgungszuverlässigkeit”
Ermittlung	Für Bestand & Prognose durch Simulation möglich
Komplexität	hoch
Ermittlungsmethode	Über Bilanzierung (Simulation mithilfe von spezialisierter Software) Siehe auch Merkblatt AGFW FW 113 „Versorgungsqualität in der Fernwärme“ (AGFW FW 113, 2017)
Berechnungsansatz	-
Zielwert bzw. -bereich	Noch zu definieren Je höher, desto besser
Benötigte Daten	Hydraulik-Modell und Netzberechnungssoftware

Die Versorgungszuverlässigkeit [-] beschreibt die Resilienz des Netzes gegen den Ausfall der Versorgung basierend auf dem Ausfall einer Leitung im Netz. Daher wird diese Kennzahl der technischen Kategorie zugeordnet. Mit einer hohen Versorgungszuverlässigkeit geht eine erhöhte Kundenzufriedenheit einher und wird entsprechend auch der “sozialen” Kategorie im Nachhaltigkeitsdreieck zugeordnet. Es gibt die Möglichkeit, die Versorgungszuverlässigkeit mit Hilfe von spezialisierter Software zu ermitteln. Hierzu ist ein funktionierendes hydraulisches Netzmodell erforderlich. Die Ermittlung dieser Kennzahl wird mit einer hohen Komplexität bewertet. Die Versorgungszuverlässigkeit eines Versorgungsnetzes ist sowohl vom Schadensverhalten als auch von der Netzstruktur (evtl. Redundanzen und Leistungsreserven in anderen Netzabschnitten) abhängig.

5.5.11 Kennzahl “CO_2”

Tabelle 19: Tabellarische Übersicht zur Kennzahl „CO_2"

Kennzahlname	“CO_2”
Kategorie	Ökologisch
Art	Bewertung
Betrachtungsebene	Netz (& Betriebsmittel)
Ermittlung	(Für Bestand & Prognose durch Simulation perspektivisch möglich)
Komplexität	hoch
Ermittlungsmethode	Über Bilanzierung
Berechnungsansatz	Noch zu definieren als Teil der Ergebnisse im Projekt „SAM-FW“
Zielwert bzw. -bereich	Noch zu definieren

Kennzahlname	“CO_2”
Benötigte Daten	Forschungsarbeit notwendig

Die Kennzahl CO_2 [CO_2-eq. kg] soll die Umweltbelastung beschreiben, welche durch Herstellung, Transport, Einbau, Betrieb und die Außerbetriebnahme (inkl. Recycling) einer Rohrleitung entstehen. Entsprechend wurde diese Kennzahl der Nachhaltigkeitsdreieck-Kategorie “Ökologie” zugeordnet. Eine genaue Definition und Berechnung werden derzeit als schwierig und umfangreich eingeschätzt. Die Bedeutung der Kennzahl wurden von den Teilnehmern der Umfrage, aufgrund bisher fehlender Definitionen und Datengrundlagen, überwiegend als niedrig eingestuft, wobei grundsätzlich ein gesteigertes Interesse besteht, Aussagen über den ökologischen Fußabdruck treffen zu können. Werte für den Teilprozess „Herstellung“ werden mittlerweile von einigen Rohrleitungsherstellern in Form einer “Environmental Product Declaration (EPD)” zur Verfügung gestellt. Allerdings ist diese Umweltdeklaration noch nicht von allen Herstellern verfügbar. Die Berechnungsansätze für die anderen Prozesse müssen noch erarbeitet und validiert werden. Hier könnte z.B. die Ökobilanzierung unterstützen.

5.5.12 Kennzahl “OPEX”

Tabelle 20: Tabellarische Übersicht zur Kennzahl „OPEX"

Kennzahlname	“OPEX”
KPI-Definition	Betriebs- und Instandhaltungskosten
Kategorie	Ökonomisch, Sozial
Art	Bewertung
Betrachtungsebene	Netz
Ermittlung	Für Bestand & Prognose durch Simulation möglich
Komplexität	niedrig
Ermittlungsmethode	Über Bilanzierung
Berechnungsansatz	$OPEX = \frac{Wartungskosten + Inspektionskosten + Reparaturkosten}{Netzlänge} \left[\frac{€}{km}\right]$ Alternativ ist auch ein Bezug zum Netzvolumen [€/m³] oder Wärmemenge [€/kW] möglich
Zielwert bzw. -bereich	-
Benötigte Daten	Dokumentierte Kosten für bereits durchgeführte Projekte bezüglich Inspektionen und Reparaturen der letzten 5 Jahre.

Die Kennzahl “OPEX” (engl. *operational expenditures*) beschreibt die Kosten, welche für Wartung, Inspektion und Reparaturmaßnahmen entstehen. Die Definition dieser

Begrifflichkeiten ist in der Norm FW 114 vom AGFW enthalten. Die Kennzahl “OPEX” gibt einen Hinweis darauf, wie groß der kurzfristige Instandhaltungsbedarf ist.

5.5.13 Kennzahl “CAPEX”

Tabelle 21: Tabellarische Übersicht zur Kennzahl „CAPEX"

Kennzahlname	“CAPEX”
KPI-Definition	Investitionskosten
Kategorie	Ökonomisch, Sozial
Art	Bewertung
Betrachtungsebene	Netz & Betriebsmittel
Ermittlung	Für Bestand & Prognose durch Simulation möglich
Komplexität	niedrig
Ermittlungsmethode	Über Bilanzierung
Berechnungsansatz	$CAPEX = \frac{Sanierungskosten + Erneuerungskosten}{Netzlänge} \left[\frac{€}{km}\right]$ Alternativ ist auch ein Bezug zum Netzvolumen [€/m³] oder Wärmemenge [€/kW] möglich
Zielwert bzw. -bereich	-
Benötigte Daten	Dokumentierte Kosten für bereits durchgeführte Projekte bezüglich Rehabilitationen der letzten 5 Jahre.

Die Kennzahl “CAPEX” (engl. *capital expenditures*) beschreibt die Kosten, welche für Rehabilitationsmaßnahmen (Sanierung oder Erneuerung) aufgewendet werden. Die Definition der Begrifflichkeiten ist in der Norm FW 114 vom AGFW enthalten.

5.5.14 Kennzahl “Temperaturniveau”

Tabelle 22: Tabellarische Übersicht zur Kennzahl „Temperaturniveau"

Kennzahlname	“Temperaturniveau”
KPI-Definition	
Kategorie	Technisch
Art	Informativ
Betrachtungsebene	Netz

Kennzahlname	“Temperaturniveau”
Ermittlung	Für Bestand
Komplexität	-
Ermittlungsmethode	Über Messung am Erzeugungsstandort
Berechnungsansatz	
Zielwert bzw. -bereich	-
Benötigte Daten	Messwerte der Erzeugungsanlag(en) als Zeitreihe(n)

Das Temperaturniveau [°C] charakterisiert ein Wärmenetz als rein informative technische Kennzahl ohne eine direkte Bewertung vorzunehmen. Hieraus können nachfolgend mehrere Informationen gewonnen werden:

Temperaturniveau im Betrachtungsjahr: T_{max}, T_{mittel}

Es kann ein Überblick über die thermische und mechanische Belastung des Netzes gewonnen werden, indem das Temperaturniveau im Betrachtungsjahr in Relation zur Auslegungstemperatur aus Hydraulik und Statik gesetzt wird.

Diese Kennzahl sollte einmal jährlich ermittelt werden.

5.5.15 Kennzahlen und Nachhaltigkeit

Je umfangreicher die Datengrundlage – Bestands- und Schadensstatistik, GIS-Daten, hydraulisches Netzmodell, Ökobilanzen, etc. – und je höher deren Qualität, desto aussagekräftiger werden die Kennzahlen.

Eine Einordnung der Kennzahlen in das Nachhaltigkeitsdreieck wurde gemäß folgender Grafik vorgenommen:

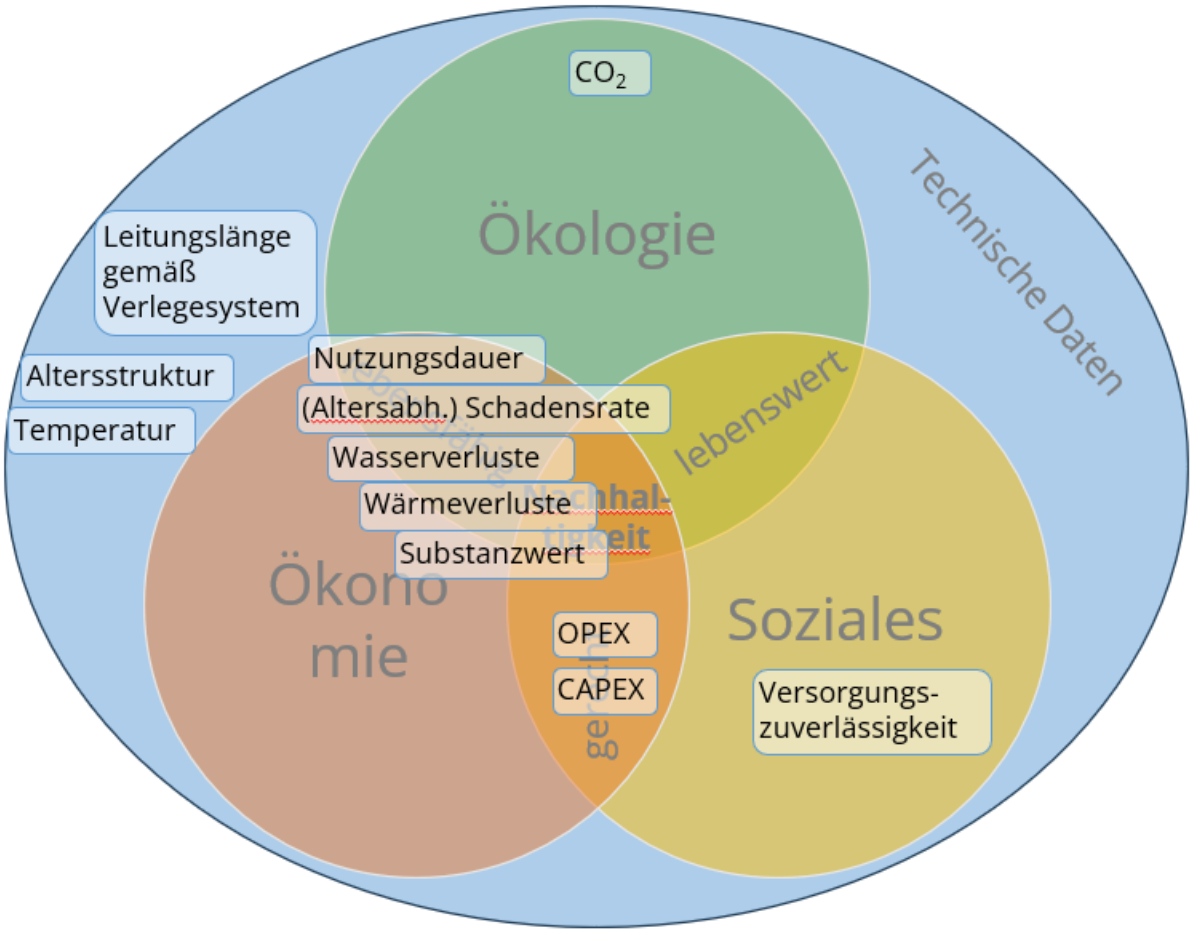


Abbildung 19: Erweitertes Nachhaltigkeitsdreieck und Zuordnung der erarbeiteten Kennzahlen (Quelle: 3S Consult GmbH)

Ein Überhang an Kriterien im Bereich der Ökonomie ist zu erkennen, was den wirtschaftlichen Druck abbildet unter denen die Fernwärmeversorgungsunternehmen ihre Infrastruktur betreiben. Gleichermaßen finden sich die Kriterien auch im Schnittstellenverhältnis zu den Bereichen Ökologie und Soziales. Diese Abhängigkeiten equilibrieren das Bild wieder.

Diese Überlegungen zu Nachhaltigkeitskriterien und Kennzahlen sind noch nicht endgültig und können im Projektverlauf iterativ weiterbearbeitet werden.

6. Schlussfolgerung

6.1 Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse

In dieser Arbeit wird ein Überblick gegeben, der zum einen die Begriffe Instandhaltung und Nachhaltigkeit im Zusammenhang mit Fernwärmenetzen definiert und zum anderen sämtliche relevanten Aspekte sammelt, die für die Entwicklung vorausschauender Instandhaltungsstrategien mit der oben genannten inhaltlichen Ausrichtung erforderlich sind.

Asset Management Fernwärmenetze: Die Erhaltung des Assets „Fernwärmenetz“ zielt darauf ab, den Wärmeabnehmer eine zuverlässige, gleichmäßige und kostengünstige Wärmeversorgung zu gewährleisten. Die begrenzte Lebensdauer von Systemkomponenten kann jedoch potenzielle Ausfälle verursachen, die Instandhaltungsarbeiten erfordern, um die Funktionalität wiederherzustellen. Instandhaltung ist nicht nur für die Betriebskontinuität unerlässlich, sondern auch für die Sicherstellung der Gesamteffizienz, Wirtschaftlichkeit und Versorgungssicherheit des Systems. **Effektive Instandhaltungsstrategien tragen dazu bei, Risiken für das System und somit Versorgungsengpässe für die Wärmeabnehmer zu minimieren, die Leistung zu optimieren und Kosten zu senken.** Grundlage des Asset Managements sind zuverlässige Bestands-, Betriebs- und Schadensdaten des Wärmenetzes. Diese Grundlage ist in Fernwärmeversorgungsunternehmen unzureichend vorhanden. Die Beteiligung an der AGFW-Bestands- und Schadensdatenbank, die Erfassung und Dokumentation von Schadensereignissen gemäß der Definition des Schadensbegriffes nach AGFW FW 114 (2013) in Verbindung mit dem gezielten Aufbau von Messpunkten im Wärmenetz zur Erfassung relevanter Betriebsparameter sind geeignete Maßnahmen zur Verbesserung der Datengrundlage zur Steigerung der Zuverlässigkeit des Asset Managements für Fernwärmenetze. Darauf aufbauend können Maßnahmen zur Umsetzung vorausschauender Instandhaltungsstrategien angegangen werden.

Vorausschauende Instandhaltungsstrategien in Fernwärmenetzen: Auf Grundlage der recherchierten Literatur erweist sich die **vorausschauende Instandhaltung (VsI) für Fernwärmenetze als ein neuartiger Ansatz**, der digitale Fortschritte wie Künstliche Intelligenz (KI), das Internet of Things (IoT) und fortschrittliche Sensortechnologien nutzt. **Voraussetzungen für die Umsetzung VsI** ist eine **Steigerung des Digitalisierungsgrades in Fernwärmenetzen** sowie die **Sammlung zuverlässiger Daten** und **Zustandsindikatoren zur Bewertung des Wärmenetzes**. Darüber hinaus sind weitere, bisher analoge Datenquellen wie bspw. Wartungsprotokolle oder vergleichbar **dokumentierte Zustandsinformationen für KI-basierte Auswertungen zugänglich zu machen**. Es ist darauf aufbauend davon auszugehen, dass VsI die rechtzeitige Identifizierung potenzieller Ausfälle ermöglicht, unnötige Reparaturen reduziert und die Zuverlässigkeit des Systems verbessert. Für das Asset Management resultiert folglich großes Potenzial datengetriebene Entscheidungen über Ressourcenallokation, Modernisierungen und Ersatzmaßnahmen zu erfassen, sowie dadurch Kostenreduktionen zu erreichen. Darüber hinaus kann VsI zur ökologischen Nachhaltigkeit beitragen, indem es Ressourcenverschwendung reduziert, die Energieeffizienz optimiert und Emissionen minimiert.

Obwohl **VsI in Branchen wie Öl und Gas bereits weit verbreitet** ist und Vorteile in diesen Anwendungen nachgewiesen sind, **fehlen bislang vergleichbare Anwendung in Fernwärmenetzen.** In den Tabellen 5-7 konnten die Autoren potenzielle Informationsquellen für die Implementierung VsI Strategien in Fernwärmenetzen und deren Stand für VsI aufbereiten. Diese bilden Ansätze, um praxisrelevante Anwendungen im Rahmen des SAM-FW Projektes umzusetzen.

Lebenszyklusbewertung, Kreislaufwirtschaft und Nachhaltigkeitskriterien für das Asset Management von Fernwärmenetzen: Die **Nachhaltigkeitsbewertung von Infrastrukturen** und technischen Bauwerken stellt **ein dynamisches und neues Forschungsfeld dar, jedoch bieten bereits Regelwerke eine Grundlage für Begrifflichkeiten, Rahmenbedingungen, Rechenmethoden und die modulare Gliederung des Lebenszyklus.** Als zentrales Werkzeug zur Bewertung der ökologischen Qualität kommt die Ökobilanzierung zur Anwendung. Im Gegensatz zu ökologischen Bewertungen wie der Umweltverträglichkeitsprüfung im Rahmen von Baumaßnahmen oder Bewertungen zu Umweltauswirkungen in Planfeststellungsverfahren werden nicht nur lokale, sondern auch globale Auswirkungen betrachtet. So kann in der Wirkungsabschätzung beispielsweise auch das Treibhauspotenzial anhand von kg CO_2 Äquivalenten bewertet werden. Vereinfacht werden Auszüge der Ökobilanzierung deshalb oft auch als „CO_2-Bilanz“ bezeichnet.

In der Fernwärme finden sich häufig **Ökobilanzierungen** von verschiedenen Arten der Wärmeerzeugung. Falls diese auch in die Bewertung der Verteilungsstruktur integriert werden, ist **ein Hotspot der Umweltwirkungen der Wärmeverlust der Rohrleitungen, welcher in der Nutzungsphase stattfindet.** Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Wärmeverluste über die Nutzungsphase (> 30 Jahre) aufsummiert werden und dadurch maßgebend das Ergebnis der Ökobilanzierung beeinflussen. Bei der **Herstellung der Leitungen ist die Produktion** der Rohrsysteme bzw. die Produktion der Ausgangsstoffe, z. B. dem Stahlrohr oder der Wärmedämmung **ein maßgeblicher Prozess**. Bisherige Studien bieten keine umfassende Grundlage für einen vergleichenden Bewertungsmaßstab, können aber auszugsweise, als ökologische Datengrundlage verwendet werden. Es ist jedoch festzustellen, dass die Datengrundlage eine zentrale Rolle bei der Ökobilanz spielt. Das Bereitstellen von ökologischen Produktdeklarationen von Rohrherstellern kann dazu beitragen, die Verwendung der Ökobilanz in der Fernwärme deutlich zu fördern.

Die Ökobilanz wird im Rahmen von Entscheidungsprozessen vor allem in frühen Entwurfs- und Planungsstadien eingesetzt, um ökologische Aspekte verschiedener Varianten zu quantifizieren und diese in den Abwägungsprozess der Planung zu integrieren. Die **Ökobilanzierung im Asset-Management**, also während der Nutzungsphase, stellt demnach einen **Sonderfall der Anwendung dar. Durch den fortgeschrittenen Kenntnisstand zur Lebensdauer der Infrastruktur können jedoch die Bewertungen präziser erfolgen und Vorteile aus einer verlängerten Nutzungsdauer quantifiziert werden.**

Die Verlängerung der Nutzungsdauer und Ausnutzung des Potenzials von materiellen Ressourcen ist auch vor dem Hintergrund der Kreislaufwirtschaft erstrebenswert, denn durch Verbundbaustoffe wie bei Kunststoffmantelrohren werden Recycling-Prozesse erschwert. Auch der Verbleib von Rohren im Baugrund kann nicht ausgeschlossen werden. Optimierungen hinsichtlich der Kreislaufwirtschaft können jedoch auch im Leitungsbau, z.B. beim Tiefbau durch die Verwendung von recyclierten Baustoffen erfolgen.

Die Bewertung der Nachhaltigkeit von Fernwärmenetzen erfordert einen umfassenden Kriterienkatalog, der ökologische, soziale und wirtschaftliche Dimensionen integriert. Es wurde eine umfassende Methodik angewandt, um 18 ursprüngliche Kriterien zu ermitteln und zu verfeinern, die schließlich zu folgenden **acht Kriterien** konsolidiert wurden:

- **Ökologische Qualität / Umwelteinwirkung**
- **Ressourceneinsatz**
- **Zuverlässigkeit und Materialbeständigkeit / -langlebigkeit**
- **Soziale Auswirkung**

- **Wirtschaftlichkeit**
- **Anpassungsfähigkeit an zukünftige Bedürfnisse**
- **Wärmeverteilungseffizienz**
- **Abfallwirtschaft**

Diese acht Kriterien entsprechen den folgenden drei Hauptpfeilern der Nachhaltigkeit:

1. Ökologische Nachhaltigkeit
2. Soziale Nachhaltigkeit
3. Ökonomische Nachhaltigkeit

Die Methodik zur Erstellung des Kriterienkatalogs betonte die Berücksichtigung wissenschaftlicher Literatur, die Einbindung von Interessengruppen und eine datenbasierte Validierung. Dieser Ansatz gewährleistet, dass die entwickelten Algorithmen praktische und quantifizierbare Nachhaltigkeitsbewertungen ermöglichen.

Die Integration der Kriterien in die Algorithmusentwicklung unterstützt eine ausgewogene Beurteilung der Nachhaltigkeit von Fernwärmesystemen. Sie optimiert den Betrieb hinsichtlich Ressourceneffizienz, Umweltverträglichkeit und sozialer Akzeptanz. Dies ist essenziell für eine nachhaltige Energiezukunft, die wirtschaftlich attraktiv, sozial gerecht und ökologisch verantwortungsvoll gestaltet ist.

Kennzahlen (Key Performance Indicator), Bewertungskriterien und zukünftige Betriebsweisen für das Asset Management von Fernwärmenetzen: Nach Durchsicht von mehr als dreißig Literaturquellen aus verschiedenen Sparten wurden **zwölf Key Performance Indicator (Kennzahlen) vorläufig ausgewählt, um ein Fernwärmeverteilungsnetz zu beschreiben**. Diese wurden in das Nachhaltigkeitsdreieck und zu den im Kapitel 4 ermittelten Nachhaltigkeitskriterien zugeordnet. Abbildung 20 zeigt die Zuordnung einzelner Kennzahlen zu den acht Nachhaltigkeitskriterien. Die Farbverläufe der einzelnen Kennzahlen in Abbildung 20 verdeutlichen, die technische (blau), ökonomischen (orange), ökologischen (grün) und sozialen (gelb) Elemente und Anwendungsmöglichkeiten der jeweiligen Kennzahl. Es wird deutlich, dass es Überschneidungen bei den Nachhaltigkeitskriterien “Ökologische Qualität/Umweltwirkung” und “Materialbeständigkeit/Langlebigkeit” gibt. Weiterhin ist zu sehen, dass alle Nachhaltigkeitssäulen repräsentiert werden.

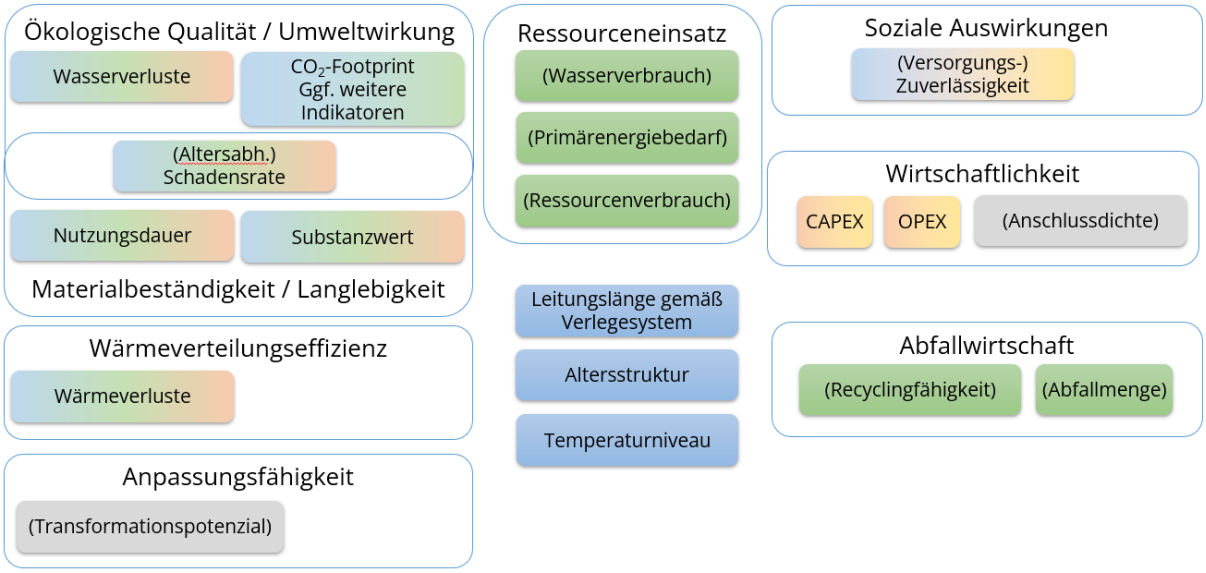


Abbildung 20: Kategorisierung der Kennzahlen (Quelle 3S Consult GmbH)

Diese Kennzahlen-Auswahl ist eine erste Iteration und kann zukünftig um weitere Kennzahlen wie bspw. Anpassungsfähigkeit, Digitalisierungsgrad und Anschlussdichte erweitert werden.

Als Datengrundlage werden Bestands- und Schadensdaten (inkl. Geo-Daten), ein hydraulisches Netzmodell, Messwerte und Betriebsdaten und Informationen aus der Buchhaltung verwendet. Dabei gilt: **Je umfangreicher die Datengrundlage und je höher deren Qualität, desto aussagekräftiger werden die Kennzahlen.** Die Zusammenhänge der Datenbasis und der Kennzahlen sind in Abbildung 17 dargestellt.

Eine Aktualisierung der Kennzahlen wird einmal jährlich empfohlen.

Die ausgewählten Kennzahlen wurden in einer Umfrage durch die Forschungsprojektteilnehmer und Fernwärmenetzbetreiber bezüglich ihrer Relevanz und Bedeutung evaluiert und bestätigt. Dabei wurde auf die Wichtigkeit von Definitionen und Begrifflichkeiten hingewiesen.

Für einen Teil der Kennzahlen fehlen noch genaue Berechnungsvorschriften sowie Zielwerte/-bereiche. Diese werden im weiteren Projektverlauf ermittelt. So ist bspw. für die Kennzahl „CO_2“ noch Forschungsarbeit notwendig. Erste Grundlagen die Bewertung auf Basis des CO_2 -Äquivalents in der Herstellung von Fernwärmerohren werden von Rohrherstellern in EPD´s ausgewiesen. Die Bewertung weiterer Lebenszyklusphasen wie Transport, Einbau, Nutzung, Instandsetzung, Rückbau und Entsorgung (ggf. Recycling) sind zunächst mit Annahmen zu versehen und dann iterativ zu verbessern.

In Zusammenhang mit Dekarbonisierung- und Transformationsmaßnahmen bestehender Wärmenetze ist auch mit veränderten Betriebsweisen, bspw. durch die Absenkung der Netztemperaturen und einer Steigerung der Dezentralität der Wärmeerzeugungsanlagen, auszugehen. **Die Auswirkungen zukünftiger Betriebsweisen können und müssen in Asset Management Simulationen berücksichtigt werden.** Die in SAM-FW erarbeiteten Kennzahlen sind entsprechende Ansätze diese Auswirkungen zu quantifizieren.

6.2 Implikationen für zukünftige Forschung und Entwicklung: Lücken und Herausforderungen

Trotz erheblicher Fortschritte im Bereich der VsI bestehen weiterhin signifikante Herausforderungen im Kontext von Fernwärmesystemen. Insbesondere lassen sich die folgenden Forschungslücken identifizieren:

1. **Fehlen standardisierter Modelle:** Die aktuellen Ansätze zur Implementierung der VsI in Fernwärmesystemen sind stark fragmentiert. Betreiber greifen häufig auf maßgeschneiderte Modelle oder bewährte Lösungen zurück. Hierfür fehlen bislang in der Praxis eingesetzte, validierte Modelle. Diese Situation erschwert die Formulierung von Anforderungen für die Standardisierung entsprechender Modelle.

2. **Unzureichende IoT-Integration für Fehlerprognosen:** Trotz der zunehmenden Verbreitung des Internets der Dinge (IoT) gibt es nur wenige Studien, die die Integration IoT-basierter Daten in VsI-Modelle für Fernwärmesysteme adressieren. Dies führt dazu, dass die potenziellen Vorteile solcher Technologien weitgehend ungenutzt bleiben.

3. **Übertragbarkeit von Methoden aus anderen Sektoren:** Viele der in Fernwärmesystemen eingesetzten Verfahren zur VsI stammen aus Branchen wie bspw. der Öl- und Gasindustrie. Diese Methoden sind oft nicht optimal an die spezifischen thermischen und hydraulischen Dynamiken von Fernwärmenetzen angepasst, was die Effektivität der VsI in diesem Bereich beeinträchtigen kann.

4. H**ybride Modellierungsansätze:** Hybride Modelle, die physikbasierte Simulationen mit datengetriebenen Ansätzen kombinieren, wurden in Fernwärmesystemen bislang kaum erforscht. Diese Modelle könnten die Vorhersagegenauigkeit verbessern und ein umfassenderes Verständnis der Systemdynamik ermöglichen.

Die dargestellten Ergebnisse zu VsI lassen im Zusammenhang mit dem aktuellen Stand von Fernwärmenetzen die Schlussfolgerung zu, dass die vorausschauende Instandhaltung ein großes Potenzial für die Optimierung von Fernwärmenetzen bergen könnte. Um dieses Potenzial voll auszuschöpfen und robuste, effiziente sowie nachhaltige Systeme zu gewährleisten, ist es jedoch erforderlich, die genannten Forschungslücken zu schließen. Insbesondere auch um durch Praxisbeispiele und Referenzen Versorgungsunternehmen für die Einführung, Umsetzungen und Verbesserung von VsI in ihren Organisationen zu überzeugen. Das BMWK geförderte Forschungsvorhaben „SAM-FW“ wird in seinem weiteren Projektverlauf daran arbeiten die aufgezeigten Lücken zu verringern.

6.3 Fazit

In der ersten Forschungsphase des Verbundforschungsvorhaben „SAM-FW“ konnte ausgehend von einer umfangreichen Literaturrecherche **der aktuelle Stand und zukünftige Entwicklungsmöglichkeiten für das Asset Management von Wärmenetzen erarbeitet** werden. Durch die Umsetzung von Digitalisierungsmaßnahmen in Fernwärmesystemen bspw. in Form von fernauslesbaren Wärmezählern in Kundenanlagen, Messstellen zur Erfassung von Betriebsparametern (Temperatur, Druck, Massenstrom) im Wärmenetz oder Messungen zur Erfassung des Zustands eines Betriebsmittels, **ist davon auszugehen, dass in den kommenden Jahren die Menge an Betriebsdaten und die Genauigkeit der Zustandserfassung des gesamten Fernwärmesystems zunehmen.** Neben den

Möglichkeiten zur Steigerung der Gesamteffizienz im Betrieb des Fernwärmesystems können diese Daten auch zur Verbesserung des Asset Managements des Wärmenetzes genutzt werden.

Im Austausch zwischen Forschungspartnern und Versorgungsunternehmen im Projektkonsortium „SAM-FW“ zeigte sich, dass bei der Implementierung zusätzlicher Messpunkte im Wärmenetz die **Vorgehensweise zur Auswahl und ggf. Priorisierung von Messpunkten an die individuelle Netzstruktur anzupassen** ist. Dabei ist es zielführend, dass die Merkmale und Besonderheiten der verschiedenen Rohrsysteme bei der Auswahl geeigneter Messtechnik (z. B. zur Zustandserfassung von Fernwärmeleitungen in nicht-begehbaren Kanalsystemen) und die Art der Rohrleitung (Transport-, Verteil- oder Hausanschlussleitung) berücksichtigt werden. Für eine Priorisierung von entsprechenden Digitalisierungsmaßnahmen eigenen sich auch thermo-hydraulische Netzsimulationen sowie Asset-Management Simulationen, um in Analogie zur risiko-orientierten Instandhaltungsstrategie, die Wichtigkeit eines Leitungsabschnittes für die Versorgungssicherheit zu bewerten und den Einbau von Messtechnik gezielt umzusetzen.

Vorausschauende Instandhaltungsstrategien bilden weiterhin einen neuen Ansatz im Asset Management von Fernwärmenetzen. Neben der Aufbereitung von Bestandsdaten, der zusätzlichen Errichtung von Messpunkten und der Digitalisierung von Zustandsinformationen zur Verwendung KI-basierter Fehlerprognosen, bildet **das Fehlen abgesicherter Praxiserfahrung zur Bestätigung des vielfach vermuteten Potenzials in der Nutzung VsI für Wärmenetze ein großes Hemmnis.** Für die Überwindung sind die in Kapitel 6.2 aufgezeigten Wissenslücken zu verringern. Hierzu sollen die praxisorientierten Ergebnisse des Forschungsprojektes „SAM-FW“ zukünftig weiter beitragen.

Die Darstellung der Ergebnisse der Literaturrecherche zu **Aspekten der Nachhaltigkeit und des Asset Managements zeigen bereits heute große Synergien**, bspw. in Bezug auf die Langlebigkeit und des ökologischen Einflusses eines Rohrsystems, auf: Neben der Produktion der Rohre wirken sich die Maßnahmen der Bauphase und die Wärmeverluste während der langen Betriebsphase auf die Nachhaltigkeit des Wärmenetzes aus. Durch die Bestimmung der Nachhaltigkeit der verschiedenen Phasen im Lebenszyklus der Rohrsystems ist auf Grundlage der hier dargestellten Ergebnisse davon auszugehen, dass schonende, langlebige Betriebsweisen sich positiv auf technische, ökologische, ökonomische und soziale Kennzahlen auswirken.

Die Bedeutung des Asset Managements von Fernwärmenetzen steigt im Zusammenhang mit der Umsetzung der Klimaziele. Einerseits erfordern die Dekarbonisierung, die Transformation und der Ausbau bestehender Wärmenetze sowie dem Bau neuer Wärmenetze immense Investitionen in leitungsgebundene Infrastruktur. Andererseits sind zuverlässige Asset Simulationen für die Instandhaltung bestehender Wärmenetze, die Priorisierung von Maßnahmen als Grundlage für eine Transformationsstrategie und die Schaffung der Akzeptanz zur Umsetzung der Maßnahmen als Entscheidungsgrundlage für Versorgungsunternehmen unabdingbar. **Des Weiteren weisen aktuelle Entwicklungen bzw. gesellschaftliche Trends darauf hin, dass wirtschaftliche Kennzahlen zukünftig stärker durch Nachhaltigkeitsaspekte beeinflusst werden.** Neben den Trends in anderen Branchen, festigen im Bereich Fernwärme bspw. die Erstellung von CO_2-Bilanzen und Zertifikate der Rohrhersteller für ihre Produkte oder die Umsetzung der Ersatzbaustoffverordnung im Tiefbau diese These. Umso wichtiger wird es, durch die Einführung und Umsetzung der hier beschriebenen Maßnahmen bzw. der Verwendung der Kriterien sowie Kennzahlen entsprechende Bewertungsgrundlagen für Asset Entscheidungen zu ermöglichen.

Im weiteren Projektverlauf werden die Forschungspartner daran arbeiten, Praxisanwendungen für Sustainable Asset Management in der Fernwärme zu schaffen. Nach Abschluss der Grundlagen lässt sich die These formulieren, dass **durch Sustainable Asset Management Ansätze Vorteile in der Betriebsoptimierung entstehen, welche die Nachhaltigkeit, die Wirtschaftlichkeit und die Resilienz von Fernwärmenetzen verbessern.** Diese These ist durch die Untersuchungen und Ergebnisse des Projektes im weiteren Verlauf zu überprüfen.

7. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Einteilung von Instandhaltungsmaßnahmen, Quelle: AGFW FW 114 (2013) 7

Abbildung 2: Prozentualer Anteil verschiedener Rohrsysteme in 14 Wärmenetzen in Deutschland, Quelle: AGFW auf Basis von Instandhaltung-FW & SAM-FW....10

Abbildung 3 Gesamtübersicht der Instandhaltungsarten (DIN EN 13306:2018).....14

Abbildung 4: Instandhaltungstätigkeiten (DIN EN 13306:2018) 15

Abbildung 5: Einflüsse auf die technische Nutzungsdauer von Wärmenetzen 16

Abbildung 6: Erwartete technische Nutzungsdauer von Rohrleitungssystemen nach AGFW FW114 (2013).....17

Abbildung 7: Verlegesysteme der befragten Netze im Vergleich zu Befragung in Hay et al. (2022a) 20

Abbildung 8: Einfluss auf die spezifischen Wärmeverluste durch die Veränderung der Wärmeleitfähigkeit PUR in Anlehnung DIN EN 13941-1 (2022) für variierende Wärmedämmserien (1-3) 28

Abbildung 9: Einfluss auf die spezifischen Wärmeverluste durch Temperaturveränderung im Rohr in Anlehnung an DIN EN 13941-1 (2022) für variierende Wärmedämmserien (1-3) 28

Abbildung 10: Methodik für die Erschließung von verfügbaren, aber nicht direkt nutzbarer Instandhaltungsinformationen (IH-Informationen) (Bastidas, Lutz, Dittmer & Kallert, 2022) ..... - 43 -

Abbildung 11: Europäische Normstruktur in Anlehnung an vorhandene Abbildungen des CEN/TC 350 (eigene Darstellung) ..... - 46 -

Abbildung 12 Lebenszyklusphasen gem. DIN EN 17472 (eigene Darstellung) ..... - 47 -

Abbildung 13: Goal and Scope Analyse für die Ökobilanzierung im Rahmen des Forschungsprojekts SAM-FW ..... - 49 -

Abbildung 14: Das Nachhaltigkeitsdreieck..... - 55 -

Abbildung 15 Das Ergebnis der Umfrage und der Mittelwert der einzelnen Kriterien basieren auf den Antworten der 11 Teilnehmer des Konsortiums..... - 60 -

Abbildung 16: Einordnung der Kriterien in das Nachhaltigkeitsdreieck ..... - 62 -

Abbildung 17: Aktueller Stand erarbeitete Kennzahlen - Abhängigkeiten und Zusammenhänge, welche im Rahmen des Projekts erweitert und angepasst werden. Quelle: 3S Consult GmbH ..... - 66 -

Abbildung 18: Bewertung der erarbeiteten Kennzahlen durch die SAM-FW Projektpartner (Quelle: 3S Consult GmbH) ..... - 68 -

Abbildung 19: Erweitertes Nachhaltigkeitsdreieck und Zuordnung der erarbeiteten Kennzahlen (Quelle: 3S Consult GmbH)..... - 80 -

Abbildung 20: Kategorisierung der Kennzahlen (Quelle 3S Consult GmbH)..... - 84 -

8. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über verschiedene Verlegesysteme, deren Auslegungsparameter, Werkstoffe, Nutzungsdauer sowie normative Verweise 11

Tabelle 2: Randbedingungen für die Berechnung der spezifischen Wärmeverluste für drei verschiedene Wärmedämmserien D1, D2, D3 eines Kunststoffmantelrohres mit dem Nenndurchmesser des Mediumrohres DN80 in Anlehnung an DIN EN 13941-1 (2022) 27

Tabelle 3: Umweltauswirkungen der vorausschauenden Instandhaltung - Einfluss, Erklärung und Berücksichtigung 30

Tabelle 4: Übersicht zu ausgewählten Informationen zur Zustandserfassung und -bewertung von Fernwärmenetzen sowie deren Eignung für VsI 38

Tabelle 5: Übersicht zu ausgewählten Informationen zur Zustandserfassung und -bewertung des Rohrsystems Kunststoffmantelrohr sowie deren Eignung für VsI 39

Tabelle 6: Übersicht zu ausgewählten Informationen zur Zustandserfassung und -bewertung des Rohrsystems nicht-begehbare Kanalsysteme sowie deren Eignung für VsI 40

Tabelle 7: Übersicht zu ausgewählten Informationen zur Zustandserfassung und -bewertung der Rohrsystems Frei- und Gebäudeleitungen sowie deren Eignung für VsI ... 42

Tabelle 8: Auszug von Wirkungskategorien/-indikatoren für die Ökobilanzierung von Gebäuden und Bauwerken ..... - 45 -

Tabelle 9: Zuordnung der Kriterien zur Nachhaltigkeitssäule ..... - 61 -

Tabelle 10: Vorschlag für Key Performance Indicators für Fernwärmeversorgungsnetze - 66 -

Tabelle 11: Tabellarische Übersicht zur Kennzahl „Leitungslänge pro Verlegesystem" .. - 68 -

Tabelle 12: Tabellarische Übersicht zur Kennzahl „Altersstruktur" ..... - 69 -

Tabelle 13: Tabellarische Übersicht zur Kennzahl „Nutzungsdauer" ..... - 70 -

Tabelle 14: Tabellarische Übersicht zur Kennzahl „Substanzwert" ..... - 71 -

Tabelle 15: Tabellarische Übersicht zur Kennzahl „(altersabhängige) Schadensrate " ... - 72 -

Tabelle 16: Tabellarische Übersicht zur Kennzahl „Wasserverluste" ..... - 74 -

Tabelle 17: Tabellarische Übersicht zur Kennzahl „Wärmeverluste" ..... - 75 -

Tabelle 18: Tabellarische Übersicht zur Kennzahl „Versorgungszuverlässigkeit" ..... - 75 -

Tabelle 19: Tabellarische Übersicht zur Kennzahl „CO_2" ..... - 76 -

Tabelle 20: Tabellarische Übersicht zur Kennzahl „OPEX" ..... - 77 -

Tabelle 21: Tabellarische Übersicht zur Kennzahl „CAPEX" ..... - 78 -

Tabelle 22: Tabellarische Übersicht zur Kennzahl „Temperaturniveau" ..... - 78 -

9. Literaturverzeichnis

Anupam Sharma. (2019). PyTorch on Azure: Deep learning in the oil and gas industry. https://azure.microsoft.com/en-us/blog/pytorch-on-azure-deep-learning-in-the-oil-and-gas-industry/?cdn=disable

Aremu, Oluseun Omotola; Palau, Adrià Salvador; Parlikad, Ajith Kumar; Hyland-Wood, David; McAree, Peter Ross (2018): Structuring Data for Intelligent Predictive Maintenance in Asset Management. In IFAC-PapersOnLine 51 (11), pp. 514–519. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.08.370.

AVBFernwärmeV (1980). Verordnung über Allgemeine Bedingungen für die Versorgung mit Fernwärme; 13.07.2022 (https://www.gesetze-im-internet.de/avbfernw_rmev/AVBFernw%C3%A4rmeV.pdf , Aufruf 02.12.2024)

AGFW FW 410 (2011): Merkblatt AGFW FW 410:2011 Stahlmantelrohre für Fernwärmeleitungen. AGFW I Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V., Frankfurt, Germany.

AGFW FW 420 (2011): Arbeitsblatt AGFW FW 420:2011 Fernwärmeleitungen aus flexiblen Rohrsystemen. AGFW I Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V., Frankfurt, Germany.

AGFW FW 442 (2011): Druckhaltung in Heizwasser-Fernwärmesystemen. AGFW I Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V., Frankfurt, Germany.

AGFW FW 114 (2013). AGFW, Hrsg., „Merkblatt AGFW FW 114, Instandhaltungsstrategien und Rehabilitationsplanung, Mindestanforderungen“, Dez. 2013. AGFW I Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V., Frankfurt, Germany.

AGFW FW 113 (2017): Merkblatt AGFW FW 113: Versorgungsqualität in der Fernwärme.AGFW I Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V., Frankfurt, Germany.

AGFW FW 115 (2017): Merkblatt AGFW FW 115: Wasserverluste in Fernwärmesystemen. AGFW I Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V., Frankfurt, Germany.

AGFW FW 411 (2019): Fernwärmeleitungen ohne direkte Erdauflast. AGFW I Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V., Frankfurt, Germany.

AGFWFW 411 (2019): Arbeitsblatt AGFW FW 411:2019 Fernwärmeleitungen ohne direkte Erdauflast. AGFW I Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V., Frankfurt, Germany.

AGFW FW 401 (2021): AGFW Arbeitsblatt FW 401-Teil 10:2021, Kunststoffmantelrohre (KMR) als Verlegesystem der Fernwärme – Grundlagen der rohrstatischen Auslegung. AGFW I Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V., Frankfurt, Germany.

AGFW FW 510 (2022), Anforderungen an das Kreislaufwasser von Industrie- und Fernwärmeheizanlagen sowie Hinweise für deren Betrieb, AGFW, Frankfurt am Main

AGFW FW 309 (2023): Energetische Bewertung von Fernwärme und Fernklälte. Teil1: Primärenergie- Und Emissionsfaktoren nach Stromgutschriftmethode: AGFW Projektgesellschaft für Rationalisierung Information und Standardisierung mbH

AGFW FW 435 (2023): Verfahren zur Zustandsermittlung von Fernwärmeleitungen und zur Feststellung / Einmessung von Abweichungen (Leckortung), AGFW I Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V., Frankfurt, Germany.

Bai, Chunguang; Dallasega, Patrick; Orzes, Guido; Sarkis, Joseph (2020): Industry 4.0 technologies assessment: A sustainability perspective. In *International Journal of Production Economics* 229, p. 107776. DOI: 10.1016/j.ijpe.2020.107776.

Baptista, Jaime Melo; Alegre, Helena (2001): CARE-W – Computer Aided Rehabilitation of Water networks, Construction of a control panel of performance indicators for rehabilitation, WP1, Deliverable D1 – Preliminary Rehab PI System. National Civil Engineering Laboratory (LNEC)

Baptista, Jaime Melo; Alegre, Helena (2002): CARE-W – Computer Aided Rehabilitation of Water netorks, Construction of a control panel of performance indicators for rehabilitation, WP1, Deliverable D2 – Validation of the rehabilitation performance indicators system. National Civil Engineering Laboratory (LNEC)

Bastidas, E., Lutz, A., Dittmer, H. Kallert, A. (2022). Poster Technical Language Processing für Instandhaltungsinformation in Fernwärmesystemen;https://kognitive-energie-systeme.de/wp-content/uploads/2022/11/K-ES_Spotlight_Poster_2022_TLP4Heat_Bastidas.pdf; Abruf:05.12.2024

Bartolozzi, I.; Rizzi, F.; Frey, M.: Are district heating systems and renewable energy sources always an environmental win-win solution? A life cycle assessment case study in Tuscany, Italy. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews 80 (2017), S. 408-420. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.231.

BBSR (2019).Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung. (2019). Ökobaudat: Grundlage für die Gebäudeökobilanzierung (2., überarbeitete Auflage, September 2019). Zukunft Bauen: Band 09. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR).

Beloev, Hristo Ivanov; Saitov, Stanislav Radikovich; Filimonova, Antonina Andreevna; Chichirova, Natalia Dmitrievna; Babikov, Oleg Evgenievich; Iliev, Iliya Krastev (2024): Prediction of Pipe Failure Rate in Heating Networks Using Machine Learning Methods. In *Energies* 17 (14), p. 3511. DOI: 10.3390/en17143511.

Biemann, K.: Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen. Darmstadt, Technische Universität Darmstadt, Dissertationsschrift, 2015.

Breton, T.; Sanchez-Gheno, J. C.; Alamilla, J. L.; Alvarez-Ramirez, J. (2010): Identification of failure type in corroded pipelines: a bayesian probabilistic approach. In *Journal of hazardous materials* 179 (1-3), pp. 628–634. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2010.03.049.

Brugg AG, Sustainability Report 2023; 2023 https://www.bruggpipes.com/fileadmin/user_upload/downloads/esg/BRUGG_Group_Sustainability_Report_2023.pdf

BRUGG Rohrsysteme (o. D.). PREMANT Rohrsystem für ihr Hochtemperatur-Fernwärmenetz. BRUGG Rohrsysteme - Spezialist für Flexible und Starre Rohrsyst. https://www.bruggpipes.com/fileadmin/user_upload/downloads/produkte/01-nah-und-fernwaerme/premant/dokumentation/PRE_D_BRG_mai23.pdf

Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat: Leitfaden Nachhaltiges Bauen (2019).

Bundestag, Drucksache 13/11200 (1998) Urheber: Enquete-Kommission Schutz des Menschen und der Umwelt"

Bundesministeriumfür Wirtschaft und Klimaschutz (2022) : Richtlinie für die Bundesförderung für effiziente Wärmenetze„BEW“, vom 1. August 2022, https://www.bundesanzeiger.de/pub/de/amtliche-veroeffentlichung?1

Caspar et. al (2023). J. Caspar, S. Hay, A. Leuteritz, T. Grage, J. Kirchberg, "Untersuchungen zur Nutzungsdauer von Kunststoffverbundmantelrohren", EuroHeat&Power, Jg. 52, Heft 11-12/2023, S. 56-65, ISSN: 0949-166X-D9790F.

Cardoso, Maria Adriana; Matos, Rafaela (2005): CARE-S – Computer Aided Rehabilitation of Sewer networks, Construction of a control panel of performance indicators for rehabilitation, WP 1, Deliverable D2. National Civil Engineering Laboratory (LNEC)

Cortés, Pau et al. (2015): Optimisation of District Heating & Cooling systems (OPTi), D2.1: State-of-the-art, scenarios, requirements and KPI. Innerhalb Forschungs- und Innovationsförderprogramm der EU “Horizon 2020”

DGNB: Benchmarks für die Treibhausgasemissionen der Gebäudekonstruktion, 2021, https://www.dgnb.de/de/nachhaltiges-bauen/klimaschutz/toolbox/publikationen-zum-klimaschutz, Abruf am: 30.05.2024.

Deutsches Institut für Normung e.V. (2012). DIN EN 15978:2012-10: Nachhaltigkeit von Bauwerken- Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden- Berechnungsmethode; Deutsche Fassung EN_15978:2011. Beuth Verlag GmbH.

Deutsches Institut für Normung e.V. (2021a). DIN EN ISO 14040:2021-02: Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO_14040:2006_+ Amd_1:2020); Deutsche Fassung EN_ISO_14040:2006_+ A1:2020. Beuth Verlag GmbH.

Deutsches Institut für Normung e.V. (2021b). DIN EN ISO 14044:2021-02: Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen (ISO_14044:2006 + Amd 1:2017+ Amd 2:2020); Deutsche Fassung EN_ISO_14044:2006+ A1:2018+ A2:2020. Beuth Verlag GmbH.

Deutsches Institut für Normung e.V. (2022a). DIN EN 15804:2022-3: Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte. Beuth Verlag GmbH.

Deutsches Institut für Normung e.V. (2022b). DIN EN 17472:2022-09: Nachhaltigkeit von Bauwerken - Nachhaltigkeitsbewertung von Ingenieurbauwerken - Rechenverfahren; Deutsche Fassung EN 17472:2022. Beuth Verlag GmbH.

DIN 31051:2019-06, Grundlagen der Instandhaltung. DIN Media GmbH.

DIN EN 13306:2018, Instandhaltung - Begriffe der Instandhaltung; Dreisprachige Fassung EN_13306:2017. DIN Media GmbH.

DIN EN 13941-1:2022-06, Fernwärmerohre_- Auslegung und Installation von gedämmten Einzel- und Doppelrohr-Verbundsystemen für direkt erdverlegte Fernwärmenetze_- Teil_1: Auslegung; Deutsche Fassung EN_13941-1:2019+A1:2021. DIN Media GmbH.

DIN ISO 55000:2017-05. Asset Management - Übersicht, Leitlinien und Begriffe (ISO 55000:2014). DIN Media GmbH. https://dx.doi.org/10.31030/2647200

DIN ISO 55001: 2021-03. Asset Management - Managementsysteme – Anforderungen (ISO 55001:2014). DIN Media GmbH. https://dx.doi.org/10.31030/3189851

DIN ISO 55002: 2021-02. Asset-Management - Managementsysteme - Leitfaden für die Anwendung der ISO 55001 (ISO 55002:2018). DIN Media GmbH. https://dx.doi.org/10.31030/3175933

Dittmer, H., Krause, M., Eymer, K., Wolf, M., Leonhardt, C., Schwarz, W., & König, I. (2019). Lastverschiebungspotentiale von Gebäuden für Strom aus erneuerbaren Energien.

Dollhopf, Stefan (2021): Ansätze zur Energie- und CO2-Bilanzierung bei dem Bau von Entwässerungssystemen (Masterthesis). HafenCity Universität Hamburg

Doyle, L.: A Circular Economy Approach to Multifunctional Sandwich Structures: Polymeric Foams for District Heating Pre-Insulated Pipes, HafenCity Universität Hamburg, 2022.

Duden.de. (2024, 12. Februar). *Nachhaltigkeit*. Duden. https://www.duden.de/node/100643/revision/1298415

DVGW W 392 (A) (2017): Technische Regel – Arbeitsblatt DVGW W 392 (A): Wasserverlust in Rohrnetzen; Ermittlung, Wasserbilanz, Kennzahlen, Überwachung.

DVGW W 400-3 (2006): Technische Regel Arbeitsblatt W 400-3: Technische Regeln Wasserverteilungsanlagen (TRWV); Teil 3: Betrieb und Instandhaltung.

DVGW W 400-3-B1 (A) (2017): Technische Regel Arbeitsblatt W 400-3-B1 (A): Technische Regeln Wasserverteilungsanlagen (TRWV); Teil 3: Betrieb und Instandhaltung; Beiblatt 1: Inspektion und Wartung von Ortsnetzen.

DVGW W 402 (A) (2010): Technische Regel – Arbeitsblatt DVGW W 402 (A): Netz- und Schadensstatistik – Erfassung und Auswertung von Daten zur Instandhaltung von Wasserrohrnetzen.

DVGW W 403 (M) (2010): Technischer Hinweis – Merkblatt DVGW W 403 (M): Entscheidungshilfen für die Rehabilitation von Wasserverteilungsanlagen.

DVGW W 1100-2 (M) (2016): Technischer Hinweis – Merkblatt DVGW W 1100-2 (M): Definitionen von Hauptkennzahlen für die Wasserversorgung.

EnEff:Wärme: - HybridBOT_FW - Transformation und Betriebsoptimierung von Wärmenetzen für die Entwicklung hybrider Netzstruckturen zur netzdienlichen Quartiersversorgung. (2023). https://shorturl.at/klf8X

EN 13941-1 (2019): District heating pipes – Design and installation of thermal insulated bonded single and twin pipe systems for directly buried hot water networks: Part 1: Design.

EN 13941-2 (2019): District heating pipes – Design and installation of thermal insulated bonded single and twin pipe systems for directly buried hot water networks: Part 2: Installation.

EN 15632-1 (2015): Fernwärmerohre - Werkmäßig gedämmte flexible Rohrsysteme - Teil 1: Klassifikation, allgemeine Anforderungen und Prüfungen.

EN 15632-2 (2015): District heating pipes - Pre-insulated flexible pipe systems - Part 2: Bonded plastic service pipes - Requirements and test methods.

EN 15632-3 (2015): District heating pipes - Pre-insulated flexible pipe systems - Part 3: Non bonded system with plastic service pipes - requirements and test methods.

EN 489-1 (2019): Bonded single and twin pipe systems for buried hot water networks – Part 1: Joint casing assemblies and thermal insulation for hot water networks in accordance with EN 13941-1.

EN 488 (2019): Bonded single pipe systems for directly buried hot water networks – Factory made steel valve assembly for steel service pipes, polyurethane thermal insulation and a casing of polyethylene

EN 253 (2024): Fernwärmerohre - Einzelrohr-Verbundsysteme für direkt erdverlegte Fernwärmenetze - Werkmäßig gefertigte Verbundrohrsysteme, bestehend aus Stahl-Mediumrohr, einer Wärmedämmung aus Polyurethan und einer Ummantelung aus Polyethylen.

EPD Hub; HUB-2835:ENVIRONMENTAL PRODUCT DECLARATION IN ACCORDANCE WITH EN 15804+A2 & ISO 14025 / ISO 21930 Rigid Single pipe S2 - DN300 LOGSTOR Denmark Holding ApS (Kingspan/Logstor/Powerpipe); 07.02.2025

Famiglietti, J.; Gerevini, L.; Spirito, G. et al.: Environmental Life Cycle Assessment scenarios for a district heating network. An Italian case study. In: Energy Reports 7 (2021), S. 368-379. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.08.094.

Franki, Vladimir; Majnarić, Darin; Višković, Alfredo (2023): A Comprehensive Review of Artificial Intelligence (AI) Companies in the Power Sector. In *Energies* 16 (3), p. 1077. DOI: 10.3390/en16031077.

Frischknecht, R. (2020). Lehrbuch der Ökobilanzierung. Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-54763-2

Fröling, M.; Holmgren, C.; Svanström, M.: Life cycle assessment of the district heat distribution system. Part 1: Pipe Production. In: The International Journal of Life Cycle Assessment 9 (2004), Heft 2, S. 130-136. https://doi.org/10.1007/BF02978572.

Fröling, M.; Svanström, M.: Life Cycle Assessment of the District Heat Distribution System - Part 2: Network Construction (11 pp). In: The International Journal of Life Cycle Assessment 10 (2005), Heft 6, S. 425-435. https://doi.org/10.1065/lca2004.12.195.

GEF Chemnitz GmbH, IMA Materialforschung und Anwendungstechnik GmbH, IPF Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e. V. (2011):. Zeitstandfestigkeit von Kunststoffmantelrohren,. Forschung & Entwicklung, Heft 17, ISBN: 3-89999-026-9. AGFW, Frankfurt am Main

GEF Chemnitz GmbH, IMA Materialforschung und Anwendungstechnik GmbH, IPF Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e. V. (2016):. Qualitätssicherung für zukünftige Kunststoffmantelrohrsysteme in der Fernwärmeversorgung,. Forschung & Entwicklung, Heft 39, ISBN: 3-89999-062-5. AGFW, Frankfurt am Main

Guignone, G.; Calmon, J.L.; Vieira, D. et al.: BIM and LCA integration methodologies: A critical analysis and proposed guidelines. In: Journal of Building Engineering 73 (2023), S. 106780. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106780.

Hauschild, M. Z., Rosenbaum, R. K. y Olsen, S. I. (2018). Life Cycle Assessment. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3

Hay, S., Huther, H., Grimm, S., Heiler, D., Dony, J., Nielsen, H.-J. et al. (Eds.) (2020a): Heft 56: EnEff:Wärme - Technische Gebrauchsdaueranalyse von Wärmenetzen unter Berücksichtigung volatiler erneuerbarer Energien - Teil II: In situ Belastungen, Praxisanalysen und Wirtschaftlichkeit, Februar 2020. AGFW, Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK. Frankfurt am Main.

Hay, S., Huther, H., Grimm, S., Heiler, D., Dony, J., Nielsen, H.-J. et al. (Eds.) (2020b): Heft 55: EnEff:Wärme - Technische Gebrauchsdaueranalyse von Wärmenetzen unter Berücksichtigung volatiler erneuerbarer Energien - Teil I: Untersuchungsergebnisse zur Materialdegradation, Februar 2020 AGFW, Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK. Frankfurt am Main.

Hay, S., Huther, H., Sercan-Çalışmaz, K., Weidlich, I., Pourbozorgi Langroudi, P., Kropp, I., & Kästner, A. (Eds.). (2022a). EnEff:Wärme - Entwicklung von neuen und verbesserten Instandhaltungsstrategien für kleine und große Wärmeverteilnetze durch Kombination statistischer Alterungsmodelle mit materialbasierten Nutzungsdauermodellen: Instandhaltung-FW (Heft 63) , Oktober 2022.

Hay S. et al. (2022b), „Fernwärmenetze im Kontext nationaler Klimaziele: Potentiale für „UrbanTurn““, https://www.agfw.de/forschung/urbanturn/

Hay S., Huther H., Langroudi P., Weidlich I., Kropp I. (Ed.) (2023). Instandhaltung-FW: Preparing the ground on the pathway to predictive maintenance in district heating. https://www.iea-dhc.org/the-research/international-symposium-on-dhc

Hay et. al (2024). S. Hay, R. Besier, H. Huther, A. Leuteritz, "Alterung von Kunststoffmantelrohren: Einblicke in den Stand der Wissenschaft" EuroHeat&Power,Jg. 53, Heft 7-8/2024, S. 42-52, ISSN: 0949-166X-D9790F

Helmus, M.; Randel, A.: Sachstandsbericht zum Stahlrecycling im Bauwesen (2023).

Holmberg, K. (2010). E-maintenance. Springer.

Hossain, Kabir; Villebro, Frederik; Forchhammer, Søren (2020): UAV image analysis for leakage detection in district heating systems using machine learning. In *Pattern Recognition Letters* 140, pp. 158–164. DOI: 10.1016/j.patrec.2020.05.024.

Hussain, Muhammad; Zhang, Tieling; Seema, Minnat (2023): Adoption of big data analytics for energy pipeline condition assessment - A systematic review. In *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 206, p. 105061. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2023.105061.

Hyndman, Rob J.; Athanasopoulos, George (2018): Forecasting. Principles and practice. 2nd edition. Lexington, Ky.: Otexts online open-access textbook.

IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) (2024). 2024 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). Glasgow, United Kingdom, 20.05.2024 - 23.05.2024: IEEE.

Isoplus; Two Environmental Product Declarations (EPDs) for isoplus Suomi Oy; https://www.isoplus.group/newsroom/news/news/2024-09-16-two-environmental-product-declarations-epds-for-isoplus-suomi-oy/; published 16.09.2024; Abruf am 04.03.2025

Ivancic, Aleksandar; Romani, Joaquim; Salom, Jaume; Cambronero, Maria-Victoria (2021): Performance Assessment of District Energy Systems with Common Elements for Heating and Cooling. In MDPI’s Energies 2021, 14, 2334. https://doi.org/10.3390/en14082334, Basel, Switzerland

Jentsch, A., Wagner, U., Paulick, S., Rühling, K., Mangold, D., & Ott., S. (Eds.). (2020). DELFIN - Decentralized Feed-In Prognose der Auswirkungen dezentraler Einbindung von Wärme aus erneuerbaren Energien und anderen Wärmeerzeugern in Fernwärmenetze. AGFW, Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK; (Heft 54).

Jentsch, Andrej (2025): REA: resource exergy analysis - Calculation guide for energy systems, including district heating and cooling. Available online at https://www.agfw.de/rea/en, updated on 3/17/2025, checked on 3/17/2025.

Juliet, A.Hency; Legapriyadharshini, N.; Malathi, P. (2024): IoT Enhanced Resilience: Advanced AI Technique for Leak Detection and Predictive Maintenance in Oil and Gas Pipeline. In : 2024 10th International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP). 2024 10th International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP). Melmaruvathur, India, 12.04.2024 - 14.04.2024: IEEE, pp. 1338–1343.

Kirchherr, J.; Reike, D.; Hekkert, M.: Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. In: Resources, Conservation and Recycling 127 (2017), S. 221-232. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005.

Kizilöz, Burak (2024): Prediction of failures in sewer networks using various machine learning classifiers. In *Urban Water Journal* 21 (7), pp. 877–893. DOI: 10.1080/1573062X.2024.2360184.

KRV - Fachverband der Kunststoffrohr-Industrie. (2024). Kreislaufwirtschaft bei Kunststoffrohren: Der Recycling-Prozess | Kunststoffrohrverband e.V. - Fachverband der Kunststoffrohr-Industrie; https://www.krv.de/artikel/kreislaufwirtschaft-bei-kunststoffrohren-der-recycling-prozess Abruf am: 30.05.2024.

Langemeyer, S., & Krause, M. (2023). Enable-Vertikale Integration von Kommunikations-und Regelungssystemen zur Aktivierung von Flexibilität für eine quartiersweite Energieoptimierung.

Latifi, Milad; Beig Zali, Ramiz; Javadi, Akbar A.; Farmani, Raziyeh (2024): Efficacy of Tree-Based Models for Pipe Failure Prediction and Condition Assessment: A Comprehensive Review. In *J. Water Resour. Plann. Manage.* 150 (7), Article 03124001. DOI: 10.1061/JWRMD5.WRENG-6334.

Levitt, J. (2011). Complete guide to predictive and preventive maintenance (2nd ed.). Industrial Press.

LOGSTOR Denmark Holding ApS ; Pre-insulated pipes with casing of recycled external HDPE; Issue 05/2024

Lund, H., Werner, S., Wiltshire, R., Svendsen, S., Thorsen, J. E., Hvelplund, F., & Mathiesen, B. V. (2014). 4th Generation District Heating (4GDH). Energy, 68, 1–11. https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.089

Lysholm, Rebecka (2023): Sustainability investigation Furutorpsgatan – Climate calculations during the construction phase

Matos, Rafaela; Cardoso, Maria Adriana; Pinheiro, Ilidia; Almeida, Maria do Céu (2003): CARE-S – Computer Aided Rehabilitation of Sewer networks, Construction of a control panel for rehabilitation, WP 1, Deliverable D1 - Selection of a listing or rehab PIs. National Civil Engineering Laboratory (LNEC), Lisbon

Meerow, Sara; Newell, Joshua P.; Stults, Melissa (2016): Defining urban resilience: A review. In Landscape and Urban Planning 147, pp. 38–49. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2015.11.011.

Merkel, W., Lévai, P. (2014): Entwicklung eines Hauptkennzahlensystems der deutschen Wasserversorgung. In energie/wasser-praxis – DVGW-Jahresrevue 12 /2024, Seite 76-83

Millar, Michael-Allan; Yu, Zhibin; Burnside, Neil; Jones, Greg; Elrick, Bruce (2021): Identification of key performance indicators and complimentary load profiles for 5th generation district energy networks. (Glasgow)

Mobley, R. K. (2002). An introduction to predictive maintenance (2nd ed.). Elsevier Butterworth-Heinemann.

Mobley, R. K. (2004). Maintenance fundamentals (2nd ed.). Plant engineering maintenance series. Elsevier/Butterworth-Heinemann.

Nachlas, J. A. (2017). Reliability engineering: Probabilistic models and maintenance methods (Second edition). CRC Press.

Nussbaumer, T., & Holzheizwerke, A. Q. (2017). Planungshandbuch Fernwärme. EnergieSchweiz, Bundesamt für Energie.

Oliver-Solà, J.; Gabarrell, X.; Rieradevall, J.: Environmental impacts of the infrastructure for district heating in urban neighbourhoods. In: Energy Policy 37 (2009), Heft 11, S. 4711-4719. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.06.025.

Ohlsson M. (2024) Öresundskraft - Asset Managment for a resilient, sustainable, and economical heat supply; 2024

Paperpile. (o. D.). *Grounded Theory - einfach erklärt in 3 Schritten!* https://paperpile.com/de/g/grounded-theory/, Abruf:05.12.2024

Pech, Martin; Vrchota, Jaroslav; Bednář, Jiří (2021): Predictive Maintenance and Intelligent Sensors in Smart Factory: Review. In Sensors (Basel, Switzerland) 21 (4). DOI: 10.3390/s21041470.

Persson, C.; Fröling, M.; Svanström, M.: Life Cycle Assessment of the District Heat Distribution System. Part 3: Use Phase and Overall Discussion. In: The International Journal of Life Cycle Assessment 11 (2006), Heft 6, S. 437-446. https://doi.org/10.1065/lca2005.08.225.

Plattform Industrie 4.0 (2024): What is Industrie 4.0? Available online at https://www.plattform-i40.de/IP/Navigation/EN/Industrie40/WhatIsIndustrie40/what-is-industrie40.html, updated on 7/15/2024, checked on 7/15/2024.

Poliurs; Environmental Product Declaration: The pre insulated steel pipes for district heating and cooling from Poliurs; EPD registration Number: S-P-03081; 07/2022

Post, W.; Susa, A.; Blaauw, R. et al.: A Review on the Potential and Limitations of Recyclable Thermosets for Structural Applications. In: Polymer Reviews 60 (2020), Heft 2, S. 359-388. https://doi.org/10.1080/15583724.2019.1673406.

Pourbozorgi Langroudi, Pakdad (2022): An Analysis of the most Frequent Operational Temperature of four District Heating Networks of Germany: HafenCity Universität Hamburg.

Ran,Y.; Zhou, X.; Lin, P.; Wen, Y. & Deng, R. (2019). A Survey of Predictive Maintenance: Systems, Purposes and Approaches.

Ramnäs O. & Jarfelt U. (2008). New materials and constructions for improving the quality and lifetime of district heating pipes including joints – thermal, mechanical and environmental performance. https://www.iea-dhc.org/fileadmin/documents/Annex_VIII/Final_Report_8DHC-08-01.pdf

Reiter, Sigrid; Pacot, P.E. (2011): District heating and energy indicators: a method to assess the link between urban planning characteristics and energy efficiency of district heating networks. University of Liége & Management & Analysis (LEMA) in Belgien

RINA C. (Autoren nicht richtig erkennbar) (2019): ENVISION – Energy HarVesting by Invisible Solar IntegratiON in building skins, D5.1 – KPIs plan for monitoring and assessment of the technologies at demo site levels. (WP5). Innerhalb Forschungs- und Innovationsförderprogramm der EU “Horizon 2020”. Ref. Ares(2019)479586 - 28/01/2019

Ristimäki, M.; Säynäjoki, A.; Heinonen, J. et al.: Combining life cycle costing and life cycle assessment for an analysis of a new residential district energy system design. In: Energy 63 (2013), S. 168-179. https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.10.030.

Ross, Philip; Maynard, Kasia (2021): Towards a 4th industrial revolution. In *Intelligent Buildings International* 13 (3), pp. 159–161. DOI: 10.1080/17508975.2021.1873625.

Saboo, S.; Shekhawat, D. (2024): Enhancing Predictive Maintenance in an Oil & Gas Refinery Using IoT, AI & ML: An Generative AI Solution. In : Day 3 Wed, February 14, 2024. International Petroleum Technology Conference. Dhahran, Saudi Arabia, 12.02.2024 - 12.02.2024: IPTC.

Schmidt, D., & Dittmer, H. (2020). Digitalisierung von Wärmeversorgungsstrukturen in einem virtuellen Wärmekraftwerk-Smart Heat.

Schmidt, Dietrich (Ed.) (2023): Guidebook for the digitalisation of district heating. Transforming heat networks for a sustainable future : final report. International Energy Agency. Frankfurt am Main, Germany: AGFW-Project Company.

Schödwell, Björn; Prof. Dr. Zarnekow, Rüdiger (2018): Kennzahlen und Indikatoren für die Beurteilung der Ressourceneffizienz von Rechenzentren und Prüfung der praktischen Anwendbarkeit. Zur Verfügung gestellt in PDF 2018-02-23_texte_19-2018_ressourceneffizienz-rechenzentren.

Schwedischer Fernwärmeverband (1998): Distributionsnycketal 1998. Zur Verfügung gestellt in PDF Distributionsnycketal 1998 SV FV.

Selcuk, S. (2017). Predictive maintenance, its implementation and latest trends. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 231(9), 1670–1679. https://doi.org/10.1177/0954405415601640

SPD, Bündnis 90/Die Grünen und FDP (2021). Mehr Fortschritt wagen: Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit. https://www.spd.de/fileadmin/Dokumente/Koalitionsvertrag/Koalitionsvertrag_2021-2025.pdf

Spiess, Michael (2013): Entwicklung von Key Performance Indicators zur Senkung des CO_2-Ausstoßes entlang einer Supply Chain im Bereich der Lebensmittelindustrie (Diplomarbeit). Technische Universität Dortmund.

Susto, G. A., Beghi, A. & Luca, C. de (2012). A Predictive Maintenance System for Epitaxy Processes Based on Filtering and Prediction Techniques. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 25(4), 638–649. https://doi.org/10.1109/TSM.2012.2209131

Technische Anschlussbedingungen (TAB) für den Anschluss an Wärmenetze: der Vattenfall Wärme Berlin AG. (2024).

Technische Anschlussbedingungen [TAB-HW]: Für den Anschluss an das Hamburger Heizwasser-Wärmenetz der Hamburger Energiewerke GmbH. (2024). https://shorturl.at/cvGX7

Technische Anschlussbedingungen für Raumheizungs-,Wassererwärmungs-,Lüftungs- und Klimaanlagen (TAB): der Fernheizwerk Neukölln Aktiengesellschaft. (2000). https://fhw-neukoelln.de/wp-content/uploads/2022/06/Technische-Anschlussbedingungen.pdf

Technische Anschlussbedingungen (TAB): der BTB für die Versorgung mit Wärme aus Fernwärmeanlagen. (2018). https://www.btb-berlin.de/fileadmin/user_upload/files/fernwaerme/TAB_Fernwaerme_200918.pdf

University of Perugia (UNIPG) (2019): SWS heating – Development and Validation of an Innovative Solar Compact Selective-Water-Sorbent-Based Heating System – Work Package 2 – Deliverable Report 2.5. Zur Verfügung gestellt in PDF SWS Heating - KPI.

Vauchez, M.; Famiglietti, J.; Autelitano, K. et al.: Life Cycle Assessment of District Heating Infrastructures: A Comparison of Pipe Typologies in France. In: Energies 16 (2023), Heft 9, S. 3912. https://doi.org/10.3390/en16093912.

Walls, Lesley (2016): Risk, Reliability and Safety. Proceedings of ESREL 2016 (Glasgow, Scotland, 25-29 September 2016). Boca Raton: CRC Press. Available online at http://gbv.eblib.com/patron/FullRecord.aspx?p=4748352.

Weidlich, I.; Grajcar, M.: Expected potential of bound and recycled backfill material in low temperature district heating networks. In: Energy Procedia 128 (2017), S. 150-156. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.035.

Weidlich, I., Dollhopf, S., Hay, S., "Alternative Backfill Materials for Sustainable District Heating Systems". Environmental and Climate Technologies, 2024, Riga Technical University, vol. 28 no. 1, pp. 639-651. https://doi.org/10.2478/rtuect-2024-0050

Zhao, Xijia; Wang, Peng (2024): A Deployable Edge Computing Solution for Machine Condition Monitoring. In : 2024 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). 2024 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). Glasgow, United Kingdom, 20.05.2024 - 23.05.2024: IEEE, pp. 1–6.

Zhou, Shoujun; Liu, Xiangrui; Tian, Yongsheng; Zhang, Chi; Li, Fachang; Jiang, Guobin (2024): Multi-fault diagnosis of district heating system based on PCA_BP neural network. In *Process Safety and Environmental Protection* 186, pp. 301–317. DOI: 10.1016/j.psep.2024.03.101.

Ahern, Jack (2011): From fail-safe to safe-to-fail: Sustainability and resilience in the new urban world. In Landscape and Urban Planning 100 (4), pp. 341–343. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2011.02.021.

Coaffee, Jon (2008): Risk, resilience, and environmentally sustainable cities. In Energy Policy 36 (12), pp. 4633–4638. DOI: 10.1016/j.enpol.2008.09.048.

Newman, Peter; Kenworthy, Jeffrey R. (1999): Sustainability and cities. Overcoming automobile dependence. Washington, DC: Island Press. Available online at http://www.loc.gov/catdir/enhancements/fy0666/98042239-d.html.

10. Anhang

10.1 Kurzzusammenfassung der Literatur zu vorhandenen Kennzahlensystemen bzw. Kennzahlen

Titel:	**Kennzahlen und Indikatoren für die Beurteilung der Ressourceneffizienz von Rechenzentren und Prüfung der praktischen Anwendbarkeit**
Autor/-en:	Björn Schödwell, Prof. Dr. Rüdiger Zarnekow In Zusammenarbeit mit: Ran Liu, JensGröger & Marc Wilkens
Dateiname:	2018-02-23_texte_19-2018_ressourceneffizienz-rechenzentren
Typ	PDF
Sparte	IT
Jahr	2018
Kurzbeschreibung	
Dieses Forschungsvorhaben im Auftrag des Umweltbundesamtes „untersucht[e] Kennzahlen für die ökologische Beurteilung von Rechenzentren.“ Darin ging es um Energieeffizienz und das Verhältnis von erbrachter IT-Leistung zu in Anspruch genommenen natürlichen Ressourcen. Bestehende Kennzahlensysteme - auch im Bereich Ökobilanzierung – wurden auf Eignung überprüft. Die Lebenszyklus-Datenbanken ProBas und ecoinvent wurden zu Hilfe genommen. Es wurde ein MS Excel-basiertes Berechnungswerkzeug (KPI4DCE-Tool) entwickelt. **„Die Ressourceneffizienz eines Rechenzentrums wurde als das Verhältnis der IT-Leistung (Nutzen) zur Inanspruchnahme natürlicher Ressourcen über den gesamten Lebensweg (Aufwand) definiert.“ (S.22)** **Die Beschreibung der Berechnung von ADP (Abiotic Resource Depletion Potential = abiotischer Rohstoffverbrauch) sind sehr ausführlich.**	

Titel:	**Distributionsnycketal 1998**
Autor/-en:	Schwedischer Fernwärmeverband
Dateiname:	Distributionsnycketal 1998 SV FV
Typ	PDF
Sparte	FW
Jahr	1998
Kurzbeschreibung	

Dieses Dokument enthält Kennzahlen vom Schwedischen Fernwärmeverband. Mit den Kennzahlen soll die eigene Geschäftstätigkeit in Unternehmen beschrieben und mit den Vorjahren vergleichbar gemacht werden. Zusätzlich soll ein Vergleich zu anderen Unternehmen, die unter ähnlichen Bedingungen tätig sind, möglich sein. „Der Bericht beinhaltet die Daten von 103 Mitgliedern und 139 Netzen mit einer Gesamtlänge von 8.746 Kilometern."

Es sind sehr viele potenzielle Kennzahlen in dem Dokument enthalten.

Titel:	**Schwedische KPI 1998**
Autor/-en:	Schwedischer Fernwärmeverband
Dateiname:	Schwedische KPI 1998-V2_de
Typ	PDF
Sparte	FW
Jahr	1998
Kurzbeschreibung	
Dieses Dokument ist die deutsche Übersetzung des Originaldokuments: „Distributionsnycketal 1998 SV FV".	

Titel:	**SWS heating – Development and Validation of an Innovative Solar Compact Selective-Water-Sorbent-Based Heating System – Work Package 2 – Deliverable Report 2.5**
Autor/-en:	Responsible for Deliverable: University of Perugia (UNIPG)
Dateiname:	SWS Heating - KPI.pdf
Typ	PDF
Sparte	FW
Jahr	2019
Kurzbeschreibung	
Ziel dieses Forschungsprojektes war die Entwicklung und Validierung eines innovativen kompakten Solar-Heizsystems auf selektiver Wasser-Sorptionsmittel-Basis - ein innovativer	

saisonaler Wärmeenergiespeicher mit neuartigem Speichermaterial und Konfiguration. Ein Teil der Aufgabe bestand darin KPIs für die Bewertung der Zielerfüllung zu finden. **Das Dokument listet eine ganze Reihe an potenziellen Kennzahlen auf.**

Titel:	**Technische Regel – Arbeitsblatt DVGW W 392 (A): Wasserverlust in Rohrnetzen; Ermittlung, Wasserbilanz, Kennzahlen, Überwachung**
Autor/-en:	DVGW
Dateiname:	DVGW_W_392 (A) Wasserverlust in Rohrnetzen; Ermittlung, Wasserbilanz, Kennzahlen, Überwachung, September 2017
Typ	PDF
Sparte	TW
Jahr	2017
Kurzbeschreibung	
Dieses Arbeitsblatt unterstützt „die Erstellung der Wasserbilanz, die Ermittlung des Wasserverlustes, die Bildung zugehöriger Kennzahlen [q_{VR} und ILI] und die zugehörige Überwachung von Rohrnetzen. […] Der *ILI* [*Infrastructure Leakage Index* der International Water Association IWA] berücksichtigt mehr für den Wasserverlust relevante Netzstrukturparameter als der q_{VR}.“	

Titel:	**Technische Regel Arbeitsblatt W 400-3: Technische Regeln Wasserverteilungsanlagen (TRWV); Teil 3: Betrieb und Instandhaltung**
Autor/-en:	DVGW
Dateiname:	DVGW_W_400-3-Technische Regeln Wasserverteilungsanlagen (TRWV) Teil 3 Betrieb und Instandhaltung-2006-9
Typ	PDF
Sparte	TW
Jahr	2006
Kurzbeschreibung	
Das DVGW Arbeitsblatt W 400-3 “gilt für den Betrieb und die Instandhaltung von Wasserverteilungsanlagen für die Trinkwasserversorgung.” Es behandelt die Ziele der	

Wasserversorgung, Begriffsdefinitionen, beschreibt die verschiedenen Arten von Instandhaltungsstrategien und behandelt in Kapitel 11 die (altersabhängigen) Schadensraten von verschiedenen Materialien. Zusätzlich gibt es Überblick zu den Themen Datenerfassung, Dokumentation und Schadensstatistik.

Titel:	**Technische Regel Arbeitsblatt W 400-3-B1 (A): Technische Regeln Wasserverteilungsanlagen (TRWV); Teil 3: Betrieb und Instandhaltung; Beiblatt 1: Inspektion und Wartung von Ortsnetzen**
Autor/-en:	DVGW
Dateiname:	DVGW_W_400-3-B1 (A) Technische Regeln Wasserverteilungsanlagen (TRWV); Teil 3 - Betrieb und Instandhaltung; Beiblatt 1 - Inspektion und Wartung von Ortsnetzen, September 2017
Typ	PDF
Sparte	TW
Jahr	2017
Kurzbeschreibung	
Das DVGW Arbeitsblatt W 400-3 B1 behandelt die Beschreibung des Netzzustandes mittels der Wasserverluste und den damit korrelierenden Schadensraten und Turnuslängen für Inspektionen.	

Titel:	**Technische Regel – Arbeitsblatt DVGW W 402 (A): Netz- und Schadensstatistik – Erfassung und Auswertung von Daten zur Instandhaltung von Wasserrohrnetzen**
Autor/-en:	DVGW
Dateiname:	DVGW_W_402-Netz- und Schadenstatistik - Erfassung und Auswertung von Daten zur Instandhaltung von Wasserrohrnetzen-2010-9
Typ	PDF
Sparte	TW
Jahr	2010
Kurzbeschreibung	
Dieses Arbeitsblatt „beinhaltet die Erfassung und Auswertung belastbarer Bestands-, Zustands- und Umgebungsdaten von Wasserverteilungsanlagen. Zu den Zustandsdaten gehören	

insbesondere die Schadensdaten [, welche] zur Prognose von Ausfall- und Schadensraten [dienen] und damit zur Ermittlung von Restlebensdauern herangezogen [werden].“

Titel:	**Technischer Hinweis – Merkblatt DVGW W 403 (M): Entscheidungshilfen für die Rehabilitation von Wasserverteilungsanlagen**
Autor/-en:	DVGW
Dateiname:	DVGW_W_403-Entscheidungshilfen für die Rehabilitation von Wasserverteilungsanlagen-2010-4
Typ	PDF
Sparte	TW
Jahr	2010
Kurzbeschreibung	
Das Merkblatt W 403 setzt statistische und analytische Betrachtungen [Bestands- und Schadensstatistik] in die konkrete Anwendung der Rehabilitation um.“ Es werden verschiedene Methoden zur Bestimmung des Rehabilitationsbedarfes erläutert.	

Titel:	**Merkblatt AGFW FW 113: Versorgungsqualität in der Fernwärme**
Autor/-en:	AGFW
Dateiname:	FW 113 - Versorgungsqualität in der Fernwärme, Stand Juli 2017
Typ	PDF
Sparte	FW
Jahr	2017
Kurzbeschreibung	
Dieses Merkblatt “betrachtet das gesamte Fernwärmesystem mit Blick auf die Versorgungszuverlässigkeit[...]”. **Der Abschnitt 7 behandelt die “Zuverlässigkeit (der Netze)”.**	

Titel:	Merkblatt AGFW FW 114: Instandhaltungsstrategien und Rehabilitationsplanung, Mindestanforderungen
Autor/-en:	AGFW
Dateiname:	E_FW_114_M_2013-11
Typ	PDF
Sparte	FW
Jahr	2013
Kurzbeschreibung	
Dieses Merkblatt gibt Hinweise für Handlungs- und Entscheidungshilfen bezüglich Instandhaltungsstrategien, einer strukturierten Rehabilitationsplanung und Mindestanforderungen an die zugrunde liegenden Daten. **Die altersabhängige Schadensrate von Betriebsmittelgruppen scheint eine geeignete Kennzahl zu sein.**	

Titel:	Merkblatt AGFW FW 115: Wasserverluste in Fernwärmesystemen
Autor/-en:	AGFW
Dateiname:	FW 115, Wasserverluste in Fernwärmesystemen, Juli 2017
Typ	PDF
Sparte	FW
Jahr	2017
Kurzbeschreibung	
Dieses Merkblatt gibt Hinweise für die Ermittlung, Strukturierung und qualitative Bewertung der Wasserbilanz eines Fernwärmesystems. **Die volumenbezogene Kennzahl Leckwasser K_V wird in Abschnitt 6 dargestellt und scheint eine geeignete Kennzahl zu sein.**	

Titel:	Entwicklung eines Hauptkennzahlensystems der deutschen Wasserversorgung
Autor/-en:	Dr.-Ing. Wolf Merkel, Peter Lévai

Dateiname:	1412merkel
Typ	PDF (Zeitungsartikel in energie/wasser-praxis 12 /2024, Seite 76-83)
Sparte	TW
Jahr	2014
Kurzbeschreibung	
Zusammentragung und Analyse von in Benchmarkingprojekten verwendeten Kennzahlensysteme in der deutschen Wasserwirtschaft. Diese wurden ergänzt und ein Hauptkennzahlensystem der deutschen Wasserversorgung erarbeitet. Grundlage dafür war das ab 2003 angewendete IWA-Kennzahlensystem. Die Initiative und Bearbeitung erfolgt durch BDEW, DVGW und VKU. Die 95 Kennzahlen beziehen sich auf Versorgungssicherheit, Qualität, Kundenservice, Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit.	
	Siehe: DVGW W 1100-2-M

Titel:	**Technischer Hinweis – Merkblatt DVGW W 1100-2 (M): Definitionen von Hauptkennzahlen für die Wasserversorgung**
Autor/-en:	DVGW
Dateiname:	DVGW_W_1100-2-M Definitionen von Hauptkennzahlen für die Wasserversorgung, Februar 2016
Typ	PDF
Sparte	TW
Jahr	2016
Kurzbeschreibung	
Dieses Merkblatt beinhaltet eine einheitlich definierte Kennzahlenbasis für Wasserversorgungsunternehmen. **Im Dokument sind detaillierte Angaben zu Formeln und zugrunde liegende Daten enthalten.**	

Titel:	**Masterthesis "Kennzahlenkatalog für Fernwärmesysteme”**
Autor/-en:	Rupert Wieser
Dateiname:	KPI_2019_Wieser_Kennzahlenkatalog_für_Fernwärmesysteme

Typ	PDF
Sparte	FW
Jahr	2019
Kurzbeschreibung	
Die Masterarbeit beinhaltet „die im Wesentlichen in einem Fernwärmenetzsystem zu überwachenden (aktuell 142) Kennzahlen. […] Aus der Zusammenstellung lassen sich die Messgrößen, System- und Betriebsparameter eines Fernwärmesystems ableiten, welche für ein Monitoring nötig sind.“ Diese Arbeit beinhaltet ebenfalls eine Literaturrecherche der Kennzahlen für Fernwärmesysteme, welche in offiziellen Normen enthalten sind (FW 308, FW 309-1, FW 311, FW 309-5, FW 310-1, FW 309-4, DIN EN 15314, …) **„Ein Schwerpunkt [der Arbeit lag] in der klaren Definition und Strukturierung der Kennzahlen“, deren Zuordnung zu Teilsystemen mit eindeutigen Systemgrenzen, um Bilanzierungen und Berechnungen klarer zu definieren.**	

Titel:	**Diplomarbeit „Entwicklung von Key Performance Indicators zur Senkung des CO_2-Ausstoßes entlang einer Supply Chain im Bereich der Lebensmittelindustrie“**
Autor/-en:	Michael Spiess
Dateiname:	DA_2013_Spiess-1
Typ	PDF
Sparte	Logistik
Jahr	2013
Kurzbeschreibung	
Diese Arbeit beschreibt die Berechnung des CO2-Ausstoßes während des Transportweges von Lebensmitteln. Dieser soll gesenkt werden, um die politischen und gesellschaftlichen Ziele zur Minimierung der Auswirkungen auf den Klimawandel zu erfüllen. Die Grundlagen zur Erfassung von THG-Emissionen wurden sehr ausführlich und anschaulich erläutert und die Umrechnung in ein CO_2-eq Wert. Es sind KPIs enthalten, die ggf. als Kennzahlen für FW-Netze verwendet werden können – CO2-Emissionen, Treibhausgasemissionen und Transporteffizienz.	

Titel:	CARE-S – Computer Aided Rehabilitation of Sewer networks Construction of a control panel for rehabilitation WP 1, Deliverable D1 - Selection of a listing or rehab PIs
Autor/-en:	Rafaela Matos, Maria Adriana Cardoso, Ilidia Pinheiro, Maria do Céu Almeida National Civil Engineering Laboratory (LNEC)
Dateiname:	CARE-S_d1_control_panel_of_performance_indictors
Typ	PDF
Sparte	AW
Jahr	2003
Kurzbeschreibung	
„CARE-S – Computed aided rehabilitation of weser networks is a project funded by the 5th EU Framework Programme. […] The project goal is to establish a rational framework for decision-making support on sewer network rehabilitation. [… The decision maker should be supported:] *rehabilitate the right sewer at the right time by using the right rehabilitation technique at a minimum total cost, before serious failures occur* (Pro-active approach).“ **Dieses Dokument enthält die Beschreibung einer Befragung, welche an 15 Partner, verteilt über die ganze EU, verteilt wurde. Thema war die Verwendung von KPIs. Diese wurden in einer Liste gesammelt und anschließend erweitert.**	

Titel:	CARE-S – Computer Aided Rehabilitation of Sewer networks Construction of a control panel of performance indicators for rehabilitation WP 1, Deliverable D2
Autor/-en:	Maria Adriana Cardoso, Rafaela Matos National Civil Engineering Laboratory (LNEC)
Dateiname:	CARE-S_d2_predictable_performance_indicators
Typ	PDF
Sparte	AW
Jahr	2005
Kurzbeschreibung	

Im Bericht werden prognostizierbare Kennzahlen gelistet und mit Formeln beschrieben. Sie werden unterschieden nach „Environmental indicators“ (Umweltindikatoren), „physical indicators“ (Technische Indikatoren) und „operational indicators“ (betriebliche Indikatoren). **Das Dokument enthält mögliche KPIs für SAM-FW.**

Titel:	**CARE-W – Computer Aided Rehabilitation of Water networks** **Construction of a control panel of performance indicators for rehabilitation** **WP1, Deliverable D1 – Preliminary Rehab PI System**
Autor/-en:	Jaime Melo Baptista, Helena Alegre National Civil Engineering Laboratory (LNEC)
Dateiname:	CARE-W_d01-preliminary_rehab_pi_system
Typ	PDF
Sparte	TW
Jahr	2001
Kurzbeschreibung	
Es wurde eine Liste mit als relevant angesehenen Kennzahlen (133) an die Partner versendet. Die Antworten auswertend, wurde eine Liste mit Kennzahlen erzeugt, welche unterteilt wurde in die Themen „Wasserressourcen (2 PIs), „physikalische Kennzahlen“ (7 PIs), „operative Kennzahlen“ (25 PIs), „Servicequalität“ (20 PIs) und „ökonomische Kennzahlen“ (13 PIs). **Zusätzlich sind alle zugrunde liegenden Daten und Parameter aufgelistet und beschrieben, welche für die Berechnung der PIs erforderlich sind.** **Aus diesem Dokument könnten einige Kennzahlen für SAM-FW abgeleitet werden.**	

Titel:	**CARE-W – Computer Aided Rehabilitation of Water netorks** **Construction of a control panel of performance indicators for rehabilitation** **WP1, Deliverable D2 – Validation of the rehabilitation performance indicators system**
Autor/-en:	Jaime Melo Baptista, Helena Alegre National Civil Engineering Laboratory (LNEC)
Dateiname:	CARE-W_d02-validation_of_rehab_pi-2

Typ	PDF
Sparte	TW
Jahr	2002
Kurzbeschreibung	
CARE-W soll die entscheidenden Instanzen unterstützen ihr Trinkwassernetz effizient zu unterhalten und die Entscheidungsfindung die richtigen Leitungen zum richtigen Zeitpunkt zu ertüchtigen. De Ergebnisse sollen in einer Anleitung zur „Best Management Practice“ münden. Das Projekt wurde von der europäischen Gemeinschaft finanziert. **Dieser Bericht enthält die Antworten zu den Fragebögen bezüglich KPIs, welche im Teil 1 („WP1, Deliverable D1 – Preliminary Rehab PI System“) an die Partner versendet wurden. Die Antworten wurden analysiert und aufgearbeitet. Die resultierenden PIs wurden aufgelistet und genau definiert.**	

Titel:	**Optimisation of District Heating & Cooling systems (OPTi)** **D2.1: State-of-the-art, scenarios, requirements and KPI**
Autor/-en:	Pau Cortés et al.
Dateiname:	D2.1-Optimisation-of-District-Heating-Cooling-systems_Aproved-1
Typ	PDF
Sparte	FW/FK
Jahr	2015
Kurzbeschreibung	
Die zu diesen Ergebnissen führenden Forschungsarbeiten wurden im Rahmen der Fördervereinbarung Nr. 649796 aus dem Programm „Horizon 2020“ der Europäischen Union gefördert. **Ein guter Teil dieser Arbeit ist eine Recherche über die Optimierung des Betriebs von Fernwärme- oder Fernkältesysteme (DHC), welche sukzessive weitergeführt werden soll. Es geht um die automatisierte Nachfragereaktion, die Reduzierung der Spitzenbelastung, Energiereduzierung und andere.**	

Titel:	District heating and energy indicators: a method to assess the link between urban planning characteristics and energy efficiency of district heating networks
Autor/-en:	Sigrid Reiter, P.E. Pacot University of Liége & Management & Analysis (LEMA) in Belgien
Dateiname:	District_heating_and_energy_indicators_A_method_to
Typ	PDF
Sparte	FW
Jahr	2011
Kurzbeschreibung	
Dieses Paper wurde im Rahmen des UNO-Projekts „Urban Network Optimisation“ erstellt und von der Universität von Liège unterstützt. **Die Beurteilung eines Fernwärmenetzes soll über den Primärenergiefaktor (PEF) hinausgehen. Dafür werden 3 weitere Indikatoren definiert, um die Energieanalyse zu erweitern. Diese werden an einem konkreten Fernwärmenetz evaluiert und einer Sensitivitätsanalyse unterzogen. Darauf aufbauend wird eine Methodik zur Bewertung des Zusammenhangs zwischen städtischen Merkmalen und der energetischen Fernwärmeleistung vorgeschlagen. Das Thema „erneuerbare Energien“ wird für den Primärenergiefaktor behandelt.**	

Titel:	Performance Assessment of District Energy Systems with Common Elements for Heating and Cooling
Autor/-en:	Aleksandar Ivancic, Joaquim Romani, Jaume Salom, Maria-Victoria Cambronero
Dateiname:	energies-14-02334-v2
Typ	PDF (Artikel)
Sparte	FW
Jahr	2021
Kurzbeschreibung	
In diesem Artikel wird eine Methodik für die Berechnung von KPIs für Fernwärme- und -kältenetze präsentiert, wobei zwischen dem Zweck Wärme und Kühlung unterschieden wird. Es werden 11 KPIs in den Kategorien „Energie“, „Umwelt“, „Wirtschaft“ und „Sozioökonomie“ definiert.	

Titel:	ENVISION – Energy HarVesting by Invisible Solar IntegratiON in building skins D5.1 – KPIs plan for monitoring and assessment of the technologies at demo site levels. (WP5)
Autor/-en:	RINA C. (Autoren nicht richtig erkennbar)
Dateiname:	ENVISION - KPIs plan for monitoring and assessment of the technologies at demo site levels
Typ	PDF
Sparte	FW
Jahr	2019
Kurzbeschreibung	
Das Envision-Projekt behandelt das Thema der Solarwärmeernte über die gesamte Gebäudehülle, während ästhetische Aspekte weiterhin berücksichtigt bleiben. Das Dokument beinhaltet ein Verfahren für die Definition von KPIs und Datenanalyse. Die Methodik basiert auf dem ISO EN 15603:2008 Standard für „energy signature method“. Eine Anwendung ist sowohl für eigenständige als auch netzgekoppelte Lösungen anwendbar.	

Titel:	Masterthesis „Ansätze zur Energie- und CO_2-Bilanzierung bei dem Bau von Entwässerungssystemen“
Autor/-en:	Stefan Dollhopf
Dateiname:	2022-03-03_dollhopf-stefan_masterarbeit
Typ	PDF
Sparte	AW
Jahr	2021
Kurzbeschreibung	
Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Bilanzierung von CO_2-Emissionen beim Bau von Infrastrukturnetzen und der Notwendigkeit diese zu reduzieren, um dem Klimawandel begegnen zu können. „Ziel dieser Arbeit [war] demnach die Entwicklung von Bilanzierungsansätzen, welche eine Berechnung des Treibhausgaspotentials und des gesamten Primärenergiebedarfs von Entwässerungssystemen [über deren gesamte Lebensdauer] ermöglichen […]. […Es] werden typische Baustoffe und -produkte hinsichtlich ihrer	

Umweltwirkung (Ökobilanzierung) bewertet und verglichen.“ In der Arbeit erwähnte Kriterien zur Bewertung von Bauelementen wurden in die KPI-Liste für SAM-FW aufgenommen.

Titel:	**Identification of key performance indicators and complimentary load profiles for 5th generation district energy networks**
Autor/-en:	Michael-Allan Millar, Zhibin Yu, Neil Burnside, Greg Jones, Bruce Elrick (Glasgow)
Dateiname:	Millar_etal_AE_2021_Identification_of_key_performance_indicators_and_complimentary_load_profiles
Typ	PDF
Sparte	FW/FK
Jahr	2021
Kurzbeschreibung	
Dies ist ein von Experten begutachtetes, anerkanntes Autorenmanuskript zum Forschungsartikel „Identification of key performance indicators and complimentary load profiles for 5th generation district energy networks“. Darin geht es um die Identifizierung von Gebäudetypen, welche thermische Energie zum Heizen und Kühlen teilen können. Die Ergebnisse zeigen, dass Netzwerke zur gemeinsamen Nutzung von Energie im Vergleich zu einem elektrifizierten, nicht gemeinsam genutzten Energiesystem die Energiegestehungskosten um 69 % und die Kohlenstoffemissionen um 13 % senken können. Basierend auf diesen Erkenntnissen wurde eine Lastmatrix erstellt, um eine sinnvolle Energieteilung aufzeigen zu können. Trotz vielversprechender Kosteneinsparungs-ergebnisse kommen die Autoren zu dem Schluss, dass Niedertemperatur-Fernwärmenetze einen viel größeren finanziellen Nutzen haben, wenn sie angemessen dimensionierte Wärmespeicher und Nutzungszeittarife nutzen, statt Energie zu teilen. Im Vergleich zu Alternativen wie Erdgaskesseln können jedoch CO_2-Einsparungen erzielt werden. Für Wärmenetz-Planer sollte das primäre Ziel klar definiert werden: entweder CO_2-Einsparung oder Geldverdienen, da diese synergetisch nur schwer zu erreichen sind. **Genannte KPIs wurden der SAM-FW-Liste hinzugefügt, aber in dem Dokument geht es eher um optimierte Lastgänge. Dies ist für SAM-FW nicht relevant.**	

Titel:	**Sustainability investigation Furutorpsgatan – Climate calculations during the construction phase**
Autor/-en:	Rebecka Lysholm

Dateiname:	Sustainability investigation Furutorpsgatan_230630_MagnusOhlsson
Typ	PDF
Sparte	FW
Jahr	2023
Kurzbeschreibung	
Dieses Dokument beinhaltet den Vergleich von ökologischen Auswirkungen zwischen der Erneuerung einer 45m Fernwärmestrecke und deren Sanierung. Verschiedenste Materialien und Werkzeuge für das Projekt wurden nicht mit betrachtet. Lediglich Energie- und Benzinverbrauch wurden berücksichtigt. Der CO_2-Verbrauch bei der Herstellung der Werkzeuge und Maschinen für die Bauausführung wurden ebenfalls nicht berücksichtigt. Für die Parameter Energie-, Kraftstoff- und Wasserverbrauch wurden Annahmen getroffen. **Die gesammelten Daten wurden in ein Berechnungstool für Lebenszyklusanalyse „One Click LCA“ („BREEAM Infrastructure LCA (CEEQUAL)“) eingearbeitet. In den aktuellen Berechnungen wurde nur der Bauabschnitt A1-A5 berücksichtigt, eine Bewertung aus Lebenszyklusperspektive wurde für diese Szenarien nicht durchgeführt.** **Dieses Tool könnte interessant für weitere Arbeiten im SAM-FW Umfang sein, da es eine umfangreiche Datenbank für Infrastrukturelemente enthalten soll.**	

Titel:	**Life Cycle Assessment of the District Heat Distribution System – Part 1: Pipe Construction**
Autor/-en:	Morgan Fröling, Camilla Holmgren, Magdalena Svanström
Dateiname:	LCA-DHDS_1_Fröling2004_Article_LifeCycleAssessmentOfTheDistri
Typ	PDF
Sparte	FW
Jahr	2004
Kurzbeschreibung	
In diesem Artikel wird eine Ökobilanz der Produktion von Fernwärmeleitungen hergestellt, basierend auf einer Lebenszyklusinventur von cradle-to-gate im Auftrag des schwedischen Fernwärmeverbandes. **Die Produktion (bei Powerpipe Systems AB, Göteborg, Schweden) der untersuchten KMR-Rohre (Isolierung aus Cyclopentanschaum mit Serie 2 Dicke) erfolgte im Zeitraum 1999-2000. Untersucht wurde ein Doppelrohr (DN25) und Einzelrohre DN25, DN100 und DN500. Als Bestandteil der Leitung werden das Stahlmediumrohr, der Kupferdraht, die Hülle und der**	

Schaum betrachtet. Die Charakterisierung erfolgt anhand von GWP, AP und POCP und Ressourcenerschöpfung - und werden mittels zwei Gewichtungsmethoden verarbeitet (EcoIndicator99 und Ökoknappheit).

Die Software LCAiT (Life Cycle Inventory Tool) wurde zur Verwaltung der Bestandsinformationen verwendet. Es wird herausgearbeitet, dass die Herstellung der Rohre, den mit großem Abstand größten Effekt auf das GWP einer KMR-Leitung hat.

Titel:	**Life Cycle Assessment of the District Heat Distribution System – Part 2: Network Construction**
Autor/-en:	Morgan Fröling, Magdalena Svanström
Dateiname:	LCA-DHDS_2_Fröling-Svanström2005_Article_LifeCycleAssessmentOfTheDistri
Typ	PDF
Sparte	FW
Jahr	2005

Kurzbeschreibung

Dieses Dokument ist die Fortführung von Part 1 aus dem Jahr 2004. Nachdem im letztgenannten Dokument die Herstellung von KMR-Rohren untersucht wurde, beschäftigt sich dieses Dokument nun mit dem Transport der Rohre von der Fabrik zur Baugrube und den Installationsprozess. Die Studie umfasst 100m Rohrsystem (Vor- und Rücklauf). Die Rohrsysteme sind identisch zu denen aus Part 1. 2 verschiedene Umgebungen wurden betrachtet: städtisch (charakterisiert

durch die Notwendigkeit, die Asphaltdecke aufzubrechen und wiederherzustellen und um Aushubmaterial von der Baustelle) und Grünflächen (ohne Asphalt und wo ein Teil des Aushubmaterials in der Baustelle wiederverwendet werden kann).

Die Emissionen durch die Rohrherstellung und den für den Rohrgrabenaushub benötigten Diesel dominieren die Umweltauswirkungen. Um die Umweltauswirkungen zu minimieren, soll der Aushub minimiert werden. Dies ist möglich durch Doppelrohre (kleinerer Graben) und die spartenübergreifende gleichzeitige Bebauung von Trassen. Die Kennzahlen sind wieder GWP, AP, POCP und Rohstofferschöpfung (Rohstoffmangel). Es wird herausgearbeitet, dass die städtische Umgebung aufgrund der Asphaltdecke, der tieferen Gräben (wegen Verkehrsbelastung) und der geringeren Wiederverwendung von Füllmaterial eine deutlich höhere Umweltbelastung generiert.

Titel:	Life Cycle Assessment of the District Heat Distribution System – Part 3: Use Phase and Overall Discussion
Autor/-en:	Camilla Persson, Morgan Fröling, Magdalena Svanström
Dateiname:	LCA-DHDS_3_Persson2006_Article_LifeCycleAssessmentOfTheDistri
Typ	PDF
Sparte	FW
Jahr	2006
Kurzbeschreibung	

Dieses Dokument ist die Fortführung einer Serie. Part 1 behandelte die KMR-Rohrherstellung, Part 2 den Transport und die Installation von Fernwärmerohrleitungen und der Part 3 betrachtet nun die Thematik der Umweltbelastung während des Betriebes.

Zugrunde gelegt wurden die gleichen Rohrsysteme und -parameter wie in den vorangegangenen Parts. Es wurden Rohre mit zwei verschiedenen Schaumtreibmitteln (Cyclopentan und Kohlendioxid) untersucht unter Berücksichtigung der Unterschiede in der langfristigen thermischen Leistung der Schäume. Für die Betrachtung der Emissionen aus der Wärmeerzeugung wurden zwei Wärmequellen berücksichtigt: Wärmeerzeugung entsprechend dem durchschnittlichen Fernwärme-Brennstoffmix, der im Jahr 2000 in Schweden verwendet wurde, und die Wärmeerzeugung unter Verwendung von ausschließlich mit Erdgas betriebenen Heizkesseln. Die verwendete Funktionseinheit beträgt 100 m des Fernwärmeverteilnetzes während einer 30-jährigen Nutzungsphase. Es wird herausgearbeitet, dass Doppelrohrsysteme eine geringere Umweltbelastung gemäß den verwendeten Parametern (GWP, AP, POCP und Rohstofferschöpfung) aufweist als 2 Einzelrohre. Das Schaumtreibmittel Cyclopentan erhält bessere Werte bezüglich der Umweltbelastung gegenüber Kohlendioxid, da die isolierende Wirkung des Schaums zum Startzeitpunkt als auch im Verlauf der Alterung besser ist. Hier wurde die Wichtigkeit der Wärmeverluste der Leitung herausgearbeitet und der SAM-FW-Liste hinzugefügt.

Titel:	List of KPI supplier perspective
Autor/-en:	-
Dateiname:	List of KPI supplier perspective.xlsx
Typ	XLSX
Sparte	FW
Jahr	2022
Kurzbeschreibung	

Das Dokument wurde von einem Fernwärmenetzbetreiber erstellt und zur Verfügung gestellt.

Es enthält in 3 Tabellenblättern eine Liste von KPIs, die für das Unternehmen relevant sind. Teilweise sind es neue KPIs, für die der Netzbetreiber noch keine eigene Berechnungsvorschrift hat.

In Dokument sind folgende Kategorien enthalten:

- **O&M Grid (Betrieb und Instandhaltung) mit 18 Kennzahlen**
- **Grid Construction (Netzbau) mit 18 Kennzahlen**
- **IVP Grid (u.a. Betrieb, Instandhaltung, Personal, Digitalisierung) mit 23 Kennzahlen**

Titel:	**Overview_KPI**
Autor/-en:	-
Dateiname:	Overview_KPI.xlsx
Typ	XLSX
Sparte	FW
Jahr	2022

Kurzbeschreibung

Das Dokument wurde von einem Fernwärmenetzbetreiber erstellt und zur Verfügung gestellt.

Es enthält eine Liste von KPIs, die in verschiedenen (Balanced) Scorecards des Unternehmens Verwendung finden.

Die Liste hat insgesamt 229 Einträge, wobei viele Kennzahlen mehrfach vorkommen, weil sie in unterschiedlichen Scorecards genutzt werden. Es gibt insgesamt sehr wenige netzbezogene Kennzahlen. Viele Kennzahlen beziehen sich auf die Unternehmensebene oder auch den Erzeugungsteil.



Ein Praxisleitfaden des
AGFW | Der Energieeffizienzverband
für Wärme, Kälte und KWK e. V

Stresemannallee 30 | D-60596 Frankfurt am Main
Telefon: +49 69 6304-1 | Telefax: +49 69 6304-391
info@agfw.de | www.agfw.de